

# **Modellgestützte Qualitätsregelung durch eine adaptive, druckgeregelte Prozessführung beim Spritzgießen**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Felix Alexander Heinzler

aus

Wuppertal

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein

Tag der mündlichen Prüfung : 15.12.2014



The desire for knowledge shapes a man

Patrick Rothfuss





## **Vorwort / Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen an der Universität Duisburg-Essen von 2010 bis 2014. Ich möchte mich insbesondere bei Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Wortberg für die fachliche Unterstützung und Förderung bedanken. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen sind ein wichtiger Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit gewesen. Das große Interesse an der Thematik und die lösungsorientierte, vorausschauende Denkweise waren eine wichtige Stütze während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein für die Übernahme des Ko-referates und den fachlichen Austausch innerhalb des letzten Jahres bedanken. Diese Arbeit hat von den eingebrachten Fragestellungen und den übergreifenden Diskussionen sehr profitiert.

Meiner Frau Lena und meiner Familie möchte ich ganz besonders für die Unterstützung in den letzten Jahren danken. Der Rückhalt und die verständnisvolle Art, die mir entgegen gebracht worden ist, haben das Gelingen dieser Arbeit ermöglicht und maßgeblich zur Erreichung der persönlichen und fachlichen Ziele beigetragen. Meiner Schwester Lisa danke ich für die Korrekturanteile an meiner Arbeit. Der hohe Zeitaufwand für die Durchsicht ist mir durchaus bewusst.

Ein großer Dank gilt meinen Kollegen. Die angenehme Arbeitsatmosphäre sowie der themenübergreifende Austausch haben einen wichtigen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet. Die Zeit am Lehrstuhl wird dank der dort gelebten Arbeitsweise immer mit vielen positiven Erinnerungen verbunden sein. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Oliver te Heesen, Gregor Karrenberg, Dr. Christoph Mielicki, Dr. Kenny Saul, Christoph Ketteler, Thomas Reinhard sowie meinen langjährigen Bürokollegen Dr. Jens Dörner, Dr. Marco Lenzen und Burkhard Gronhoff bedanken. Ein besonderer Dank gilt Herrn Marius Janas für die entgegengebrachte Unterstützung, die gemeinsame Verfolgung der fachlichen Zielsetzungen sowie für die immer offene und ehrliche Art, auf die ich mich in den letzten Jahren verlassen konnte. In diesem Zuge möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Markus Bussmann bedanken, der ebenfalls ein wichtiger Diskussionspartner bei komplexen Fragestellungen war.

Für die hervorragende Unterstützung und Zusammenarbeit danke ich der Fa. Krauss Maffei Technologies GmbH und dem Team um Herrn Dr. Reinhard Schiffers und Stefan Kruppa. Des Weiteren danke ich der Lanxess Deutschland GmbH, Bayer MaterialScience AG sowie BIA Kunststoff- und Galvanotechnik GmbH für die Unterstützung dieser Arbeit und die gemeinsamen fachlichen Diskussionen im Bereich der Materialcharakterisierung und Veredelungsprozesse. Herrn Prof. Dr. rer. nat. M. Winterer gilt mein Dank für die Möglichkeit das Labor des NPPT innerhalb dieser Arbeit nutzen zu dürfen.

Abschließend bedanke ich mich bei den Studenten, die innerhalb ihrer Abschlussarbeiten und Tätigkeit am Lehrstuhl wichtige Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Patrick Weiß, Alexander Backsmann, Jens Siepmann, Thomas Bach, Maurice Mistler, Jan Langehegermann sowie Michael Stanko. Ihr großes persönliches Engagement und die fachliche Begeisterung haben maßgeblich zur erfolgreichen Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Stands der Technik in dieser Arbeit beigetragen.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Summary .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	2
<b>2 Prozessrelevante Materialeigenschaften von Polymeren .....</b>	<b>4</b>
2.1 Kenngrößen zur Beschreibung der Materialeigenschaften .....	4
2.1.1 Rheologisches Verhalten.....	4
2.1.2 Thermodynamisches Verhalten.....	6
2.2 Alterung von Polymeren .....	9
2.2.1 Chemische Strukturänderungen durch thermisch induzierte Kettenlängenänderung.....	10
2.2.2 Chemische Strukturänderungen durch thermisch-oxidativen Abbau.....	10
2.2.3 Chemische Strukturänderungen durch hydrolytischen Abbau.....	10
2.2.4 Physikalische Strukturänderungen und mechanischer Abbau .....	11
2.3 Modellierung der Materialeigenschaften .....	12
2.3.1 Das Carreau-Model und Ansätze zur Integration von Temperatureinflüssen....	12
2.3.2 Der Strukturänderungsfaktor.....	13
2.4 Simulation des Spritzgießprozesses .....	15
2.5 Bewertung des Kenntnisstandes.....	16
<b>3 Prozessführung und Qualitätsregelung beim Spritzgießen .....</b>	<b>17</b>
3.1 Konventionelle Prozessführung .....	17
3.1.1 Wahl eines robusten Betriebspunktes .....	18
3.2 Qualitätsanforderungen beim Spritzgießen.....	19
3.2.1 Einflüsse auf Prozess- und Produktqualität.....	19
3.3 Stand der Qualitätsregelung und Prozesskontrolle beim Spritzgießen .....	22
3.3.1 Modellbildung zur prognosebasierten Qualitätsregelung .....	22
3.3.2 Ansätze zur Prozessführung und Prozessregelung anhand von Prozessparametern.....	23
3.3.3 Ansätze zur Prozessregelung anhand von Prozesskennzahlen.....	25
3.3.4 Adaptive Prozessregelung .....	27
3.4 Bewertung des Kenntnisstandes.....	30
<b>4 Qualitätsrelevante Materialeigenschaftsvariationen.....</b>	<b>31</b>
4.1 Betrachtete Polymertypen .....	31
4.2 Erfassung rheologischer Materialparameter .....	31
4.2.1 Versuchsaufbau und Messablauf.....	32
4.3 Chemische Strukturänderungen .....	34

4.3.1	Thermische Beständigkeit .....	34
4.3.2	Degradation und thermisch induzierter Kettenabbau .....	35
4.3.3	Nachkondensation und thermisch induzierter Kettenaufbau .....	36
4.4	Physikalische Strukturänderung .....	38
4.4.1	Einfluss der Materialkonditionierung .....	38
4.4.2	Hydrolytisch verstärkte Degradation .....	40
4.5	Darstellung von Chargeneinflüssen .....	42
4.6	Modellbildung zur Beschreibung des Fließverhaltens .....	43
4.6.1	Zeitunabhängige Temperaturverschiebung .....	43
4.6.2	Modellbildung zur Beschreibung irreversibler chemischer Strukturänderungen .....	43
4.6.3	Modellbildung zur Beschreibung reversibler Einflüsse auf die physikalische Struktur .....	45
4.7	Diskussion der Ergebnisse .....	49
<b>5</b>	<b>Darstellung von Alterungseinflüssen in der Spritzgießsimulation.....</b>	<b>51</b>
5.1	Aufbereitung der Materialdaten und Definition der Randbedingungen .....	51
5.1.1	Thermodynamisches Werkstoffverhalten .....	52
5.1.2	Messgrößen, Prozessparameter und Randbedingungen der Simulation .....	55
5.2	Simulation und Darstellung von alterungsbedingten Prozesseinflüssen.....	57
5.2.1	Resultierender Druckverlauf in der Füllphase .....	57
5.2.2	Diskussion der Umschaltkriterien .....	59
5.2.3	Einflüsse auf qualitätsrelevante Prozesskennzahlen .....	61
5.3	Entwicklung einer Regelstrategie zur Steigerung der Prozessqualität.....	66
5.3.1	Adaptive druckgeregelter Prozessführung.....	66
5.3.2	Einfluss der Regelstrategie auf qualitätsrelevante Parameter .....	68
<b>6</b>	<b>Intelligente Prozessregelung zur Qualitätssteigerung.....</b>	<b>70</b>
6.1	Darstellung der Versuchsumgebung und Datenverarbeitung .....	70
6.1.1	Spritzgießmaschine .....	70
6.1.2	Werkzeug .....	71
6.1.3	Messtechnischer Aufbau und Datenverarbeitung .....	71
6.1.4	Versuchsdurchführung .....	72
6.2	Inlinedetektion von Prozessschwankungen.....	73
6.2.1	Definition der Qualitätsanforderungen an die Prozess- und Produktqualität.....	73
6.2.2	Abbildung materialinduzierter Prozessschwankungen .....	73
6.2.3	Abbildung von Einflüssen auf spezifische Qualitätskriterien .....	80
6.3	Intelligente Qualitätsregelung .....	84
6.3.1	Adaptive druckgeregelter Prozessführung.....	85
6.4	Experimentelle Validierung .....	92
6.4.1	Validierung der Regelung der Einspritzbewegung .....	92
6.4.2	Validierung der adaptiven Umschaltpunktberechnung .....	95
6.4.3	Validierung der Nachdruckanpassung .....	96

6.5	Diskussion der Ergebnisse und Grenzen des Regelungskonzeptes.....	98
<b>7</b>	<b>Prozess- und produktspezifische Qualitätsmerkmale .....</b>	<b>99</b>
7.1	Einfluss auf die Oberflächenqualität .....	100
7.2	Potentiale durch ein erweitertes Verarbeitungsfenster.....	101
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick.....</b>	<b>103</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>105</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>119</b>
10.1	Materialien .....	119
10.2	Verwendete Messmittel.....	119
10.3	Modellparameter Rheologie.....	119
10.4	Spritzgießmaschine, Sensorik und Beistellaggregate .....	119
10.5	Maschineneinstellungen .....	120

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
CI	Computational Intelligence
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Dynamische Differenzkalorimetrie)
EtherCAT	Ethernet for Controller and Automation Technology
FI	Fließindex
HKV	Hochdruck-Kapillar-Viskosimeter
ipe	Institut für Produkt Engineering
MFI	Melt Flow Index
mpti	mass packed through inlet
MPV	Masseäquivalent
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
pVT	Pressure-Volumen-Temperature
RR	Rotationsrheometer
RSP	Rückströmsperre
TC	Thermo-Couple
VARAN	Versatile Automation Random Access Network
VI	Viskositätsindex
WLF	Williams, M. L.; Landel, R. F.; Ferry, J. D

## Formelzeichenverzeichnis

### Lateinische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a_{PC}$	[-]	physikalische Strukturänderung (PC: <b>physical change</b> )
$a_{PC\_IS}$	[-]	materialspezifische Einflussstärke der phys. Strukturänderung
$a_{SC}$	[-]	Strukturänderungsfaktor
$a_{SC\_UL}$	[-]	obere Grenze der Strukturänderung
$a_T$	[-]	Temperaturverschiebungsfaktor
$A$	$[Pa \cdot s]$	Nullviskositätsniveau im Carreau-Ansatz nach [MH+11b]
$A_K$	$[mm^3]$	Fläche des Einspritzkolbens
$B$	$[1/s]$	reziproke Übergangsgeschwindigkeit im Carreau-Ansatz
$c_{H2O}$	[%]	Restfeuchtegehalt
$c_P$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	spezifischen Wärmekapazität, benötigte Energie um die Temperatur einer Masseneinheit um ein Kelvin zu erhöhen
$C$	[-]	Steigung der Viskositätsfunktion im strukturviskosen Bereich

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$C$	$[-]$	Parameter im WLF-Ansatz
$D$	$[mm]$	Schneckendurchmesser
$e$	$[-]$	Regelabweichung
$E_0$	$\left[\frac{J}{mol}\right]$	Fließaktivierungsenergie
$E_{0,SC}$	$\left[\frac{J}{mol}\right]$	Aktivierungsenergie für Strukturänderungen
$E_{HZ}$	$[Ws]$	Heizenergie
$E_{inj}$	$[Ws]$	Antriebsenergie Einspritzphase
$E_{plast}$	$[Ws]$	Antriebsenergie Plastifizierphase
$f_U$	$[\%]$	relative Luftfeuchtigkeit
$F_{SK}$	$[kN]$	Schließkraft
$F_Z$	$[bar \cdot s]$	Fließzahl
$G^*$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	komplexen Schubmodul
$G'$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Speichermodul
$G''$	$\left[\frac{N}{m^2}\right]$	Verlustmodul
$H_c$	$[J]$	kunststoffspezifisch Enthalpie zum Aufschmelzen oder Abkühlen
$k$	$[-]$	Konsistenzfaktor
$k_0$	$\left[\frac{1}{s}\right]$	Strukturänderungsrate
$K$	$[-]$	Einstell- und Kalibrierungsparameter
$K_D$	$[-]$	Differentiationsfaktor
$K_I$	$[-]$	Integrationsfaktor
$K_P$	$[-]$	Proportionalfaktor
$K_{pND}$	$[-]$	spezifische Kalibrierungsfaktor der Nachdruckregelung
$K_V$	$[-]$	Vorsteuerungsfaktor oder Verstärkungsfaktor
$m_b$	$[g]$	Bauteilgewicht
$M_{plast}$	$[Nm]$	Antriebsmoment Plastifizierphase
$n$	$[-]$	Steigung der Viskositätsfunktion im strukturviskosen Bereich
$n_{plast}$	$\left[\frac{1}{s}\right]$	Drehzahl des Plastifizierantriebs
$p$	$[bar]$	Druck
$p_{inlet}$	$[bar]$	Massedruck am Inlet
$p_{inj}$	$[bar]$	referenzierter Druckverlauf in der Einspritzphase
$p_{RSP}$	$[bar]$	referenzierte Druckgrenze zum Schließverhalten der RSP
$P_{HZ}$	$[kW]$	Heizleistung
$P_{inj}$	$[kW]$	Antriebsleistung in der Einspritzphase
$p_{ND}$	$[bar]$	Druckverlauf in der Nachdruckphase
$\dot{q}$	$\left[\frac{W}{g}\right]$	spezifische Wärmestrom

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$R$	$\left[\frac{J}{mol \cdot K}\right]$	allgemeine Gaskonstante
$R^2$	$[-]$	Korrelationskoeffizient
$R_Z$	$[\mu m]$	Mittlere Rauhtiefe
$s$	$[mm]$	Schneckenposition oder Schneckenweg
$s_{RSP}$	$[mm]$	referenzierte Schneckenposition zum Schließverhalten der RSP
$s_u$	$[mm] / [cm^3]$	Schneckenpositions- oder volumenabhängiges Umschaltkriterium
$t$	$[s]$	Zeit
$t_1$	$[s]$	charakteristische Übergangszeit im Carreau-Ansatz
$t_{\blacksquare^\circ C}$	$[s]$	Alterungszeit bei Temperaturstufe $\blacksquare^\circ C$
$t_A$	$[min]$	Alterungszeit
$t_{inj}$	$[s]$	Einspritzzeit
$t_M$	$[min]$	Messzeit am Rotationsrheometer
$t_{plast}$	$[s]$	Plastifizierzeit
$t_{tA}$	$[min]$	thermische Ausgleichszeit
$t_{sA}$	$[min]$	stationäre Ausgleichszeit
$t_H$	$[min]$	Homogenisierungszeit am Rotationsrheometer
$t_V$	$[s]$	materialspezifische maximale Verweilzeit / Verarbeitungszeit
$T$	$[K] / [^\circ C]$	Temperatur
$T$	$[K]$	absolute Temperatur im Arrhenius-Ansatz
$\dot{T}$	$\left[\frac{K}{min}\right]$	Abkühlgeschwindigkeit
$T_0$	$[K]$	Bezugstemperatur im Arrhenius-Ansatz
$T_E$	$[K]$	Erweichungstemperatur
$T_{efc}$	$[K]$	extrapolierte Endtemperatur in der Kristallisationskurve
$T_{eic}$	$[K]$	extrapolierte Anfangstemperatur in der Kristallisationskurve
$T_{fc}$	$[K]$	Endtemperatur in der Kristallisationskurve
$T_G$	$[K]$	Einfriertemperatur oder Glasübergangstemperatur
$T_i$	$[K]$	partielle Temperatur
$T_{ic}$	$[K]$	Anfangstemperatur in der Kristallisationskurve
$T_{ieK}$	$[K]$	Effektive Kristallisationstemperatur
$T_{NF}$	$[K]$	No-Flow-Temperature
$T_{pc}$	$[K]$	Peak-Temperatur in der Kristallisationskurve
$T_s$	$[K]$	materialspezifische Standardtemperatur im WLF-Ansatz
$T_s$	$[K]$	materialspezifische Schmelztemperatur
$T_t$	$[K]$	Übergangstemperatur im Tait-Modell
$T_U$	$[^\circ C]$	Umgebungstemperatur
$T_V$	$[^\circ C]$	materialspezifische Verarbeitungstemperatur
$T_{wkz}$	$[^\circ C]$	Temperatur der Werkzeugtemperierung
$TI$	$[K s]$	integrale Temperaturerhöhung



Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$v$	$\left[\frac{m^3}{kg}\right]$	spezifisches Volumen
$v_{inj}$	$\left[\frac{mm}{s}\right]$	Schneckenvorschub- oder Einspritzgeschwindigkeit
$\dot{V}_{inj}$	$\left[\frac{cm^3}{s}\right]$	Einspritzvolumenstrom
$V$	$[cm^3]$	Volumen
$V_U$	$[\%]$	Füllgrad am Umschaltpunkt
$W_e$	$[bar \cdot s]$	Einspritzarbeit
$y$	$[-]$	Stellgröße

## Griechische Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	Wärmeübergangskoeffizient
$\dot{\gamma}$	$[1/s]$	Schergeschwindigkeit
$\eta$	$[Pa \cdot s]$	(Dynamische) Viskosität
$\eta_0$	$[Pa \cdot s]$	Nullviskosität
$\eta^*$	$[Pa \cdot s]$	Komplexe Viskosität
$\lambda$	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Wärmeleitfähigkeit
$\tau$	$\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	Schubspannung
$\omega$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	Kreisfrequenz oder Winkelgeschwindigkeit

## Operatoren und Substitutionen

Operator / Substitution	Bedeutung
$ \blacksquare $	Betrag von $\blacksquare$
$\blacksquare'$	Ableitung nach dem Ort von $\blacksquare$
$\dot{\blacksquare}$	Ableitung nach der Zeit von $\blacksquare$
$\overline{\blacksquare}$	Mittelwert von $\blacksquare$
$\blacksquare_{10}$	(Gleitender) Mittelwert aus 10 Werte von $\blacksquare$
$\Delta \blacksquare$	Differenz
$\blacksquare_{ref}$	Referenzzustand
$\blacksquare^{\circ C}$	Messpunkt oder Zustand bei $\blacksquare^{\circ C}$

## Zusammenfassung

Aktuelle Maschinenteknik beim Spritzgießen erfüllt die Anforderung höchster Reproduzierbarkeit bei den Achsenbewegungen und der Wiederholgenauigkeit eingestellter Prozessparameter. Um allerdings die Qualitätsanforderungen aktueller Produktionen und Anwendungen zu erfüllen, reicht eine Reproduzierung der Einstellparameter nicht aus. Durch Schwankungen in den Systemeingängen und Einflüssen aus der Maschinenfähigkeit entstehen Variationen in der resultierenden Prozessführung mit negativen Einflüssen auf die Qualitätskriterien. Aus diesem Grund ist eine Weiterentwicklung der Prozesstechnik hin zu adaptiven Regelkonzepten unter Berücksichtigung der aktuellen Material- und Prozesssituation notwendig. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zum einen zur Entwicklung einer adaptiven, druckgeregelten Prozessführung und darüber hinaus zum umfassenden Verständnis des Materialverhaltens und prozessrelevanten Einflüssen auf dieses.

Als Zielgröße und damit Qualitätskriterium werden spezifische Oberflächeneigenschaften herangezogen, die in der industriellen Anwendung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Beispiele hierfür sind Hochglanzoberflächen oder bestimmte Oberflächentopographien zur anschließenden Veredelung durch Galvanisierung oder Lackierung der Kunststoffbauteile. Weitere Kriterien, wie das Bauteilgewicht und damit korrelierende Eigenschaften, werden ebenfalls in den Untersuchungen berücksichtigt. Als Einflussfaktoren auf die Qualitätskriterien werden variierende Materialeigenschaften betrachtet, wobei ein Schwerpunkt auf die rheologischen Eigenschaften gelegt wird. Diese können durch unterschiedliche Materialkonditionierung, z.B. Restfeuchtegehalt und zeit- sowie temperaturabhängige Alterung, oder Chargenschwankungen variieren und beeinflussen bei aktueller Prozessführung direkt die Qualitätskriterien.

Zur Beschreibung der Einflüsse auf das Materialverhalten durch die Konditionierung und Chargenunterschiede werden in einer Laboranalyse die Fließeigenschaften untersucht. Am Beispiel von Polyamid 6, Polycarbonat, Acrylnitril-Butadien-Styrol und Polybutylenterephthalat werden die Variationen der Materialeigenschaften durch diese zusätzlichen Einflussfaktoren dargestellt. Hierzu werden zum einen Messungen an einem Rotationsrheometer herangezogen und zum anderen durch Untersuchungen an einem Hochdruck-Kapillar-Viskosimeter ergänzt. Die Analyse berücksichtigt prozessrelevante Alterungseinflüsse im Bereich der Materialkonditionierung, beschrieben durch den Restfeuchtegehalt des Materials, sowie temperaturabhängiger Zeiteinflüsse. Beide Bereiche und deren Einflussstärke werden isoliert voneinander bezogen auf die Materialviskosität betrachtet, eine Beeinflussung der zeitabhängigen Reaktionen durch den Restfeuchteanteil wird ebenfalls überprüft. Dabei zeigt sich, dass materialabhängig von einer starken Variation der Viskosität durch Alterungseinflüsse ausgegangen werden muss. Dies führt materialspezifisch sowohl zu einer Reduzierung als auch zu einer Erhöhung der Viskosität, die auf eine Veränderung der Polymerstruktur zurückzuführen ist.

Die auftretenden Phänomene werden einerseits in chemische und andererseits in physikalische Strukturänderungen unterteilt. Die chemischen Strukturänderungen beschreiben die temperatur- und zeitabhängige Änderung des Kettenaufbaus der Polymere. Durch Nachkondensation wird eine Viskositätszunahme beschrieben, Umesterungsreaktionen und Kettenspaltungen bei Polykondensaten führen wiederum zu einer Reduzierung der Kettenlänge und damit geringeren Viskosität. Die chemische Strukturänderung ist als irreversibler Prozess einzustufen. Die physikalische Strukturänderung wird auf die Einlagerung von  $\text{H}_2\text{O}$ -Molekülen im freien Volumen zwischen den Polymerketten zurückgeführt. Hierdurch wird die Ketteninteraktion sowie die innerstrukturellen Bindungskräfte über Wasserstoffbrücken- und Dipolbindungen zwischen den Polymerketten beeinflusst. Durch die Einlagerung der  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle wird der Abstand der Polymerketten vergrößert, was zu einer Reduzierung der Bindungskräfte und damit Reduzierung der Viskosität führt. Dies wird als physikalische Strukturänderung beschrieben und ist als reversibler Prozess einzustufen.

Auf Basis der Analyse wird eine Erweiterung des Carreau-Ansatzes zur Integration der Konditionierungseinflüsse in ein Materialmodell vorgestellt. Zur Beschreibung der chemischen Strukturänderung wird auf das auf dem Arrhenius-Ansatz basierende Modell des chemischen Strukturänderungsfaktors zurückgegriffen. Für die Beschreibung der physikalischen Einflüsse auf die Viskosität wird ein neuer Modellansatz vorgestellt, der den physikalischen Strukturänderungsfaktor in den Carreau-Ansatz implementiert. Durch den neu vorgestellten Modellansatz ist eine vollständige Beschreibung des Fließverhaltens von Polymeren unter Alterungs- und

Konditionierungseinflüssen möglich. Dabei ist mit einer Einflussstärke der jeweiligen Strukturänderung im zweistelligen Prozentbereich unter prozessrelevanten Bedingungen zu rechnen. In Ergänzung zu der Materialcharakterisierung unter alterungsbedingten Einflüssen werden Chargenschwankungen beispielhaft diskutiert, deren Einflussstärke auf die Viskosität in einem ähnlichen Bereich anzusiedeln ist.

Das Verständnis und die erweiterte Modellbildung erlaubt eine Simulation des Spritzgießprozesses unter Berücksichtigung der beschriebenen Einflussfaktoren. Eine Darstellung der Variation qualitätsrelevanter Prozessdaten ist somit möglich. Hierfür werden die Viskositätsdaten der jeweiligen Materialien durch eine Analyse des thermodynamischen Verhaltens ergänzt. Bei der Prozesscharakterisierung in der Spritzgießsimulation wird ein Fokus auf die Betrachtung des Massedruckes sowie der Massetemperatur gelegt. Beide Prozessgrößen beschreiben den Materialzustand innerhalb der Ausbildung qualitätsrelevanter Kriterien beginnend bei dem Bauteilgewicht, den geometrischen Abmaßen und der Ausbildung der Bauteilmorphologie. Durch Variation der Materialviskosität, bedingt durch Alterungseinflüsse, Konditionierung oder Chargenschwankungen, werden die Bedingungen bei der Ausbildung der Qualitätskriterien massiv beeinflusst. So führt eine Reduzierung der Viskosität bei konventioneller Prozessführung zu einer Reduzierung des resultierenden Massedruckes beim Einspritzvorgang sowie einer Reduzierung der Massetemperatur. Eine Zunahme der Viskosität, beispielsweise durch Nachkondensationsreaktionen, führt dem entsprechend zu einer Zunahme des resultierenden Druck- und Temperaturniveaus, was insbesondere bei thermisch sensiblen Materialien als kritisch zu betrachten ist. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Prozessqualität ergibt sich aus den Bedingungen am Umschaltpunkt. Eine Diskussion der Umschaltkriterien zeigt die Unterschiede im Füllgrad der Kavität und den  $pVT$ -Bedingungen im Übergang zur Nachdruckphase in Abhängigkeit von der Prozessführung und der Variation der Materialviskosität. Die bereits bekannten Einflüsse von Restfeuchte auf das Bauteilgewicht können in der Simulation insbesondere durch die Massenzunahme in der Nachdruckphase abgebildet werden. Durch den entwickelten Ansatz zur Beschreibung des Materialverhaltens ist eine Simulation der Einflüsse durch physikalische und chemische Strukturänderungen mit sehr guter Korrelation zum Spritzgießprozess möglich. Ausgehend von den Einflüssen der Viskositätsschwankungen auf die qualitätsrelevanten Parameter der Massetemperatur und des Massedruckes wird eine neue Strategie zur Qualitätsregelung entwickelt. Basierend auf einem Referenzbetriebspunkt und einer druckgeregelten Prozessführung in der Einspritzphase ist es möglich, die qualitätsrelevanten Prozessparameter in einem engen Toleranzband konstant zu halten. Dies bildet die Grundlage der Implementierung einer neuen Qualitätsregelung beim Spritzgießen.

In Korrelation mit einer Prozesscharakterisierung an einer Spritzgießanlage werden die Einflüsse auf den Prozess und die Simulationsergebnisse validiert. Außerdem wird der Bezug zu spezifischen Qualitätskriterien hergestellt. Der aktuelle Stand der Maschinentechnik und verfügbaren messtechnischen Anbindung ermöglicht eine detaillierte Prozesscharakterisierung. Am Beispiel von Viskositätsschwankungen durch variierende Restfeuchteanteile werden die Einflüsse auf den Prozess und mögliche Prozesskennzahlen zur Detektion von Prozessschwankungen dargestellt. Diese reichen von energetischen Kennzahlen in der Plastifizierungsphase bis hin zu charakteristischen Druckverläufen in der Einspritzphase. Anhand der Ergebnisse aus der Prozesscharakterisierung und Simulation von Kompensationsstrategien wird eine neuartige, adaptive Prozessregelung implementiert. Die Qualitätsanforderungen eines konstanten Bauteilgewichtes sowie eines konstanten Massetemperatur- und Massedruckprofils können aus der Simulation übertragen werden und werden durch Oberflächeneigenschaften ergänzt. Insbesondere ausgasende Restfeuchte in Korrelation zu einer reduzierten Viskosität und eines reduzierten Druckniveaus in der Einspritzphase hat einen massiven Einfluss auf die Oberflächenqualität und führt zu Defekten durch Feuchtigkeitsschlieren und Verfärbungen.

Die Prozessregelung umfasst das Konzept einer adaptiven, druckgeregelten Prozessführung in der Einspritzphase sowie die Kompensation von Effekten durch Unterschiede im Schließverhalten der Rückstromsperre. Vervollständigt wird die Regelung durch eine modellbasierte Adaption der Nachdruckparameter. Aufbauend auf einem Referenzprozess, erkennt die Spritzgießmaschine Veränderungen im Materialverhalten und adaptiert entsprechend autonom die Prozessführung, um eine konstante Bauteilqualität zu gewährleisten. Hierdurch ist es möglich, Einflüsse variierender Materialkonditionierung oder Chargenschwankungen auf die Bauteilqualität zu kompensieren. Die durch den Referenzbetriebspunkt und das Regelkonzept hinterlegte Intelligenz führen zu einer konstanten Prozess- und Produktqualität.

In der Einspritzphase wird über einen vorgesteuerten PID-Regler ein referenziertes Massedruckprofil als Führungsgröße reproduziert. Damit ist das, im Gegensatz zur konventionellen Prozessführung konstante, Schneckenanschubgeschwindigkeitsprofil als Stellgröße direkt abhängig von der aktuellen Viskosität und damit dem Schmelzustand des Materials. Bei einem referenzierten Massedruckprofil und einer Variation der Materialviskosität wird die Schneckenanschubgeschwindigkeit adaptiv an die veränderten Bedingungen angepasst. Dabei wird insbesondere über eine adaptive Vorsteuergeschwindigkeit den hohen Beschleunigungsvorgängen zu Beginn der Einspritzphase Rechnung getragen. Als prozessadaptive Größe ergibt sich aus der mittleren Schneckenanschubgeschwindigkeit eine neue Kennzahl zur Prozesscharakterisierung. Diese wird in einem modellbasierten Ansatz zur adaptiven Nachführung des Nachdruckniveaus genutzt. Hierdurch wird die Prozessregelung in der Einspritzphase direkt zur Charakterisierung der aktuellen Prozessbedingungen genutzt und mit der Schwindungskompensation zu einer umfassenden Qualitätsregelung verknüpft. Um auch im Übergangsverhalten zwischen der Einspritz- und Nachdruckphase konstante Bedingungen in Bezug auf das  $pVT$ -Verhalten und den Füllgrad der Kavität zu gewährleisten, wird der Umschaltzeitpunkt adaptiv an die Prozessbedingungen und das Schließverhalten der Rückströmsperre angepasst.

Die Qualitätsregelung ist für die Kompensation von Einflüssen unterschiedlicher Materialkonditionierung auf die Oberflächengüte, thermische Materialbelastung sowie das Bauteilgewicht validiert. Insbesondere Oberflächendefekte durch ausgasende Restfeuchteanteile können durch das konstante Massedruckprofil in einem erweiterten Verarbeitungsbereich kompensiert werden. Des Weiteren ist die Betrachtung von Einflüssen auf den morphologischen Aufbau von Spritzgießteilen möglich. Hier sind insbesondere durch die Konstanz in den Druck- und Temperaturbedingungen bei der Ausbildung der morphologischen Struktur in der Einspritzphase ein positiver Einfluss und eine Kompensation von viskositätsbedingten Qualitätseinflüssen zu erwarten.

Zusammenfassend wird durch diese Arbeit ein neuer Stand der Technik in der Modellbildung, Materialcharakterisierung sowie Qualitätsregelung beim Spritzgießen definiert. Die dargestellten Verfahren zur Materialcharakterisierung ermöglichen eine detaillierte Analyse der Einflüsse auf das Materialverhalten und eine Beschreibung des Materialverhaltens durch die erweiterten Modellansätze. Dies kann insbesondere zur Prozesssimulation und Bestimmung von qualitätsrelevanten Variationen von Prozesskennzahlen genutzt werden. Eine Kompensation von Viskositätsschwankungen und Einflüssen auf die Prozess- und Produktqualität ist durch die vorgestellte, adaptive Qualitätsregelung möglich. Weiterführende Untersuchungen sind hier insbesondere im Bereich der Bauteilmorphologie an der Oberfläche, dem morphologischen Schichtaufbau und laminaren Zusammenhalt sowie mechanischen Eigenschaften, auch unter Berücksichtigung von Restfeuchteanteilen im Material, zielführend.

## Summary

Today's machine capability in injection molding matches the demands of high reproducibility for the axial movement and the setup of process parameters. To fulfill the demands of actual production and quality criteria, the reproduction of the process parameters is no more sufficient. Varying material properties and conditions influence the production next to the closing behavior of the non-return valve, quality defects occur. The necessary development in processing technology is reacting on the varying system inputs by an adaptive process control. This thesis supports the requirements of actual injection molding productions by the development of an adaptive, pressure controlled process management in correlation with an analysis of possible influences on the material behavior and the description of process relevant influences by an extended model approach.

In this thesis the focus is set on injection molding and the processing of technical polymers. As objective criteria and quality requirements specific surface properties are investigated with respect to their increasing relevance in today's applications. Examples are mirror polished surfaces or specific topographic requirements for further processing steps. The part weight and correlating properties are also included in the investigations. Influential factors on the quality criteria are varying material conditions, with focus on the rheological properties. By different material conditions (residual moisture, time and temperature dependent aging) or charge influences the material properties vary and influence the resulting process and product quality criteria.

The varying material properties influenced by the different conditions are described by a laboratory analysis of the flow properties. The influence range is shown exemplary by investigating polyamide 6, polycarbonate, polybutylene terephthalate and acrylonitrile-butadiene-styrene. The investigations are made at an oscillatory rheometer and supplemented by high-pressure-capillary-viscometer measurements. The analysis considers process relevant aging and material conditioning influences, described by the residual moisture content in addition to temperature and time dependent reactions. Both influences on the material viscosity are investigated separately with respect to crosslinking reactions. The investigations show a material specific influence on the viscosity and therefore high variation ratios by the described aging influences. Material specific an increased as well as a reduced viscosity has to be expected by aging dependent changes in the physical or chemical polymer structure.

According to the results of the material analysis the structural change of the polymers are divided in physical and chemical influences. The chemical influence on the polymer structure is described by the time and temperature dependent reactions that result in changing polymer chain length. By post-condensation effects an increased viscosity has to be expected. Ester rearrangements and chain scission leads on the other hand to a reduced viscosity by the reduction of the chain length. These influences on the chemical structure of polymers is irreversible. The physical structural change is based on bounded residual moisture molecules within the free space between the polymer chains. The chain interaction and linkage energy of the polymer matrix by hydrogen bridge linkage and dipoles is reduced by the bounded H<sub>2</sub>O-molecules. The increased distance between the polymer chains reduces the linkage energy and therefore affects the material viscosity. This reversible influence is described by physical structural change.

The analysis enables an extension of the Carreau-approach to integrate the material condition and aging influences into a material behavior describing model approach. As the occurring phenomena are divided into physical and chemical structural changes they are described in separated approaches. The chemical reactions are integrated by a model approach based on the Arrhenius equation. The structural change factor describes the time and temperature dependent influences on the material viscosity. For the physical influences a new extension to the Carreau-approach is presented. The physical structural change factor integrates the residual moisture influence into the viscosity model for polymer flow behavior. Combining both structural change factors and the Carreau-approach, a complete description of aging influences and conditioning effects on the material behavior of polymers is possible. The influence strength for the physical as well as the chemical reactions has to be considered in double-digit ranges. In addition to these influences, variations of the viscosity by charge variations are discussed exemplary. The recorded influences have to be considered in a comparable range.

The understanding of the polymer behavior and the extended model approach enable a detailed process simulation of the injection molding process with respect to the material condition. A description of quality relevant process parameter is possible. Therefore the calibrated viscosity models are supplemented by an analysis of the thermodynamic behavior of the polymers. The process characterization by the simulation of the injection molding process is focused on the mass temperature and pressure development during the processing. Both process parameters describe the material behavior during the processing with direct correlation to quality relevant criteria. The criteria are for example the part weight, geometrical properties and the morphological properties. By varying material viscosities influenced by the material charge, material condition and aging reactions, die processing conditions and quality related parameters are directly affected. Hence a reduction of the viscosity leads during conventional processing control to a decreased resulting pressure and mass temperature profile. If the viscosity is increased for example by post-condensation reactions, this leads to increased mass temperature and pressure profiles during the processing. Especially for thermal sensitive materials this is a critical source for quality defects. Additional influences on the process quality are linked to the conditions at the switch-over point. A discussion of different switch-over criteria shows the variations of the filling ratio and the  $pVT$ -conditions of the material during the switch-over to the packing phase. These variations depend on the materials viscosity and the process control. The known influences by residual moisture on the part weight in injection molding can be displayed by the process simulation and the new material behavior describing model. The simulation of chemical and physical influences on the polymer structure and the injection molding process is possible with a very good correlation to real processing conditions. Based on the influences of varying material viscosities on quality relevant parameters like the mass temperature and the pressure conditions during the filling and packing a new strategy for quality control is developed. A pressure controlled injection molding process is setup referenced to a good quality production point. With varying viscosities a pressure controlled injection phase enables constant processing conditions related to the quality relevant parameters. The simulation results of this new strategy are the basics for an implementation into a complete process control.

In correlation with a process characterization at an injection molding machine the simulation results and process reaction by the material condition influences are validated. The transfer of the results to specific quality criteria is possible. State of the art machine technology and the available measurement setup enable a very precise process characterization. Viscosity variations and their influence on the processing are discussed by the example of varying residual moisture content of the material. Possible process parameters for a detection model are presented, like energetic key figures during the plasticizing and characteristic pressure profiles during the injection phase. By the combined results of simulation and real process characterization compensatory strategies and a new process control is developed. Related to the process characterization and the simulation results a pressure referenced, adaptive process control is implemented. The quality criteria of a constant part weight and constant mass temperature and pressure profile can be transferred from the simulation to the real processing. These criteria are supplemented by surface property requirements. Especially outgassing residual moisture in correlation with a reduced viscosity resulting in a reduced pressure profile during the filling has a massive influence on the surface quality. At high moisture content surface defects occur.

The process control includes a new concept of an adaptive pressure controlled process management during the injection phase with a compensation of the varying closing behaviors of the non-return valve. The process control is completed by an adaptive modification of the packing parameters. The injection molding machine reacts self-optimizing and intelligent on changing process properties and adapts the process parameters to secure a constant part quality. By the new concept influences by the material condition and charge influences on the part quality are compensated by adapting the actual process parameters in comparison to a reference process parameter setup and the actual processing conditions. The implemented intelligence by the referenced operation point and the control system lead to a constant process and part quality.

During the injection phase a pre-controlled PID-controller adapts the injection speed to a referenced pressure profile as command variable. The injection speed is as regulating variable directly linked to the actual material viscosity and processing conditions. Considering viscosity variations the process control adapts the normally constant injection speed to the variations to reproduce the referenced pressure profile. The pre-control speed

compensates the high acceleration at the beginning of the injection movement and is continuously adapted to the processing. A detailed characterization of the actual processing conditions and variations is possible by calculating the average injection speed. By a model based approach the average injection speed is used to adapt the packing pressure. The process control in the injection phase is therefore used on the one hand for a monitoring of the processing conditions and on the other hand combined by the adaption of the packing parameters to a complete process control with compensation of shrinkage. To secure constant conditions related to the  $p\dot{v}T$ -behavior and the filling ration of the cavity at the switch-over point, a process adaptive switch-over point is also defined and integrated into the control system. The closing behavior of the non-return valve is detected and therefore the switch-over point modified during the injection phase.

The concept is validated and functional for quality influences on the part weight, thermal load of the melt and surface properties. Especially surface properties and influences of outgassing residual moisture are compensated by the referenced pressure profile during the injection phase in an extended processing recommendation range. Additionally the discussion of influences on the morphological properties is possible. In this case the constant pressure and temperature during the filling has a positive influence on the build-up of the morphological structure of the part, viscosity related variations are compensated.

By this thesis a new state of the art in characterization and modelling of material behavior, process characterization and process control in injection molding is defined. The presented methods to characterize the material properties enable a detailed analysis of influences on the viscosity and description by the new model approach. This supports the process simulation and analysis of influences by varying material properties on quality related parameters. A compensation of process variations and influences on the process and product quality is enabled by the presented adaptive quality control. Further investigations have to focus on the part morphology and surface properties, the setup and coherence of the laminar layers during the filling of the cavity and mechanical properties with respect to the residual moisture content of the material.





# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die industrielle Produktion in Hochlohnländern sieht sich zunehmend den Herausforderungen individueller Kundenbedürfnisse und einem zunehmenden Kostendruck, resultierend aus den globalisierten Märkten, gegenüber gestellt. Insbesondere in der Kunststoffverarbeitung nimmt diese Individualisierung von Produkten auf Grund der Flexibilität in der Formgebung und Verarbeitung sowie der exakten Abstimmung der Materialeigenschaften auf den Anwendungsfall zu. Die Wettbewerbsfähigkeit wird dabei durch innovative Entwicklungen im Bereich der Produkte, die zunehmende Kombination aus Dekor und Funktion, aber auch durch die stetige Weiterentwicklung von Fertigungsprozessen als Impulse für Anwendungsmöglichkeiten sichergestellt. Innovationstreiber für diese Entwicklung ist hierzulande häufig die Automobilindustrie [In14]. Länder mit einem hohen technischen Standard und hohen Lohnkosten definieren sich durch ein sehr hohes Maß an Qualität in den hergestellten Maschinen und Produkten. Um trotzdem neben dem qualitativen Vorteil im Preis konkurrenzfähig zu bleiben, sind neue Möglichkeiten, kostengünstige Prozesse in der Produktion einzusetzen und bestehende Verfahren zu optimieren, der Weg in die Zukunft für die industrielle Produktion in Deutschland. Aktuelle Entwicklungen ermöglichen eine hohe Automatisierung in der Fertigung sowie die Kombination komplexer Fertigungsschritte und Werkstoffsysteme. Mittelfristig ist die effiziente Nutzung von Rohstoffen und Energie ein wichtiger Faktor, um kostengünstige Prozesse betreiben zu können [Eu14]. Die effiziente Nutzung von Ressourcen darf sich nicht nur auf eine Verringerung des Werkstoffeinsatzes an den Produkten, sondern muss sich vielmehr auch auf die Reduzierung von Ausschussraten, die Kombination von Werkstoffsystemen sowie die Verarbeitung von Regranulat beziehen. Dabei stehen die Personal- und Rohstoffkosten weiterhin vor den Energiekostenanteilen. [Br11]

Die Produktanforderungen können zunehmend nur durch die Kombination von Werkstoffsystemen und mehrstufigen Produktionsprozessen erfüllt werden. Dabei ist die Anwendung des Spritzgießverfahrens häufig ein zentraler Bestandteil von hybriden Verarbeitungsprozessen in der Kunststoffverarbeitung, unterstützt durch die zunehmende Entwicklung im Bereich der In-Mold-Verfahren [Br14]. Insbesondere bei komplexen Werkstoffkombinationen, Formteilgeometrien und Veredelungsprozessen findet das Spritzgießverfahren ein breites Anwendungsfeld. Aktuell treten vermehrt optische Anwendungen mit speziellen Anforderungen an die Oberflächenqualität, in Kombination mit der direkten Funktionsintegration in den Vordergrund [Ba13, BF+14a, Pr13]. Im Zuge der zunehmenden Automatisierung und Verkettung der Fertigungsprozesse nimmt auch die Notwendigkeit einer detaillierten Prozessüberwachung und robusten Prozessführung zu. Die Herausforderungen bestehen darin, die hohen Qualitätsanforderungen trotz Schwankungen in den Eingangsgrößen gewährleisten und Störeinflüsse frühzeitig identifizieren zu können [Kö14, Sc14]. Beispielanwendungen sind galvanisierte Kunststoffbauteile sowie Hochglanzoberflächen. Hier reichen die aktuell verfügbaren Regelkonzepte und Methoden der Prozessführung nicht aus, um eine konstante Bauteilqualität zu gewährleisten. Hohe Ausschussraten sind die Folge. Bei verketteten Fertigungsprozessen steigen die Qualitätsanforderungen mit jeder Schnittstelle zu Folgeprozessen und gleichzeitig steigen die Kosten entlang der Verarbeitungskette für identifizierte Störungen und Bauteile mit Qualitätsdefekten. Insbesondere bei den hohen Qualitätsanforderungen für Dekorbauteile und galvanisierte Oberfläche werden vielfach kostenintensive Sichtprüfungen jedes Bauteils durchgeführt. [Gr14, GD14, Mu14]

Im Maßstab von Produktionszellen und standortübergreifenden Kontrollmechanismen wird zunehmend auf die Verbindung der Produktionsprozesse über eine virtuelle Umgebung gesetzt. Die Prozesse sollen in direkter Kommunikation miteinander eine Anpassung an den aktuellen Zustand des Materials oder Produktes vornehmen und Parametervariationen über eine virtuelle Abbildung der Prozesskette abstimmen. [Br10, Ne13, Wü07] Bezogen auf die Verarbeitung beim Spritzgießen, ist eine Identifikation des Materialzustandes und Kommunikation der einzelnen Prozessphasen für eine adaptive Prozessregelung der erste Schritt zur Sicherstellung einer konstanten Qualität. Aktuelle Anlagentechnik reproduziert die voreingestellten Prozessparameter, adaptiert diese aber nicht entsprechend der aktuellen Prozesssituation sowie den Anforderungen der Schnittstellen

zu Folgeprozessen oder Qualitätskriterien. Störgrößen wirken sich somit trotz eines robusten Betriebspunktes auf die Qualitätskriterien der Bauteile aus. Dabei ergeben sich in häufigen Fällen Störgrößen aus vorgeschalteten Prozessen sowie aus den in Tabelle 1-1 zusammengefassten Einflüssen.

Tabelle 1-1 Zusammenfassung von Einflüssen auf die Prozess- und Produktqualität

<b>Einfluss</b>	<b>Auswirkung</b>
<i>Chargenschwankungen</i>	<i>Schwankungen in z.B. der Materialviskosität oder des Kristallisationsverhaltens</i>
<i>Wechselnde thermische Belastung des Materials</i>	<i>Materialveränderungen durch thermische Belastung bei Stillstandzeiten und veränderten Trocknungsbedingungen</i>
<i>Schwankende Restfeuchteanteile</i>	<i>Einflüsse auf die Materialeigenschaften und Prozessstabilität</i>
<i>Wechselnde Regranulat-Anteile</i>	<i>Einflüsse auf die Materialeigenschaften, z.B. Viskosität</i>
<i>Verschleiß</i>	<i>Einfluss auf die Reproduziergenauigkeit der Achsenbewegungen</i>
<i>Schließverhalten der Rückströmsperre</i>	<i>Einfluss durch die Viskosität, Position im System Zylinder-Schnecke und Verschleiß auf das verdrängte Schmelzevolumen</i>

Ausgehend von einem guten Wartungszustand der Produktionsanlagen sowie einer aktuell verfügbaren hohen Maschinenfähigkeit, kann der Einfluss der Störgrößen auf die Qualitätskriterien durch die Wahl eines robusten Betriebspunktes reduziert werden [Bo94]. Die Auswirkungen der Störgrößen werden durch die Wahl des Betriebspunktes allerdings nur gedämpft, nicht kompensiert. Alleine für den Spritzgießprozess reicht dies bei den zunehmend komplexen Anforderungen nicht aus, sodass durch Prozessschwankungen noch immer hohe Ausschussraten entstehen [GD14, Mu14, Sc14]. Da ausgehend von einer sehr guten Maschinenfähigkeit viele der Störeinflüsse auf den Materialzustand und die Materialeigenschaften zurückzuführen sind, werden diese innerhalb dieser Arbeit fokussiert. Dabei sind insbesondere Einflüsse auf die Materialeigenschaften durch das Handling als Störungsursache zu betrachten. Diese lassen sich in die Bereich der Materialkonditionierung und Alterungseffekte einteilen. Hinzu kommen Schwankungen innerhalb der zwischen Verarbeiter und Rohstofflieferant abgestimmten Toleranzen durch Chargeneinflüsse.

Für Hochglanzoberflächen ist die optische Unversehrtheit des Produktes ein maßgebliches Qualitätsmerkmal. Durch hohe Restfeuchteanteile im verarbeiteten Material können Schlieren, Verfärbungen und Wellenbildung zum Ausschuss des Bauteils führen. Bei der Verarbeitung von hygroskopischen Thermoplasten ist eine der wichtigen Schnittstellen jene zwischen dem Spritzgießprozess und einer vorgeschalteten Trocknung. Die nach Herstellerangaben maximal zulässigen Restfeuchteanteile für technische Kunststoffe liegen mit 0,02 % (Polybutylenterephthalat und Polycarbonat) und 0,1 % (Polyamid 6) in sehr niedrigen Bereichen, die bereits nach kurzer Zeit bei Lagerung unter Umgebungsbedingungen überschritten werden. Da der Restfeuchtegehalt als Einflussgröße auf Grund komplexer und zeitintensiver Messverfahren nicht kontrolliert wird, ist der Trocknungsprozess ausschließlich zeit- und temperaturgeregelt. Durch Unterschiede in den Umgebungsbedingungen, dem Materialhandling, dem Ausgangszustand des Materials sowie dem Massedurchsatz kann der Konditionierungszustand bei Eintritt in die Spritzgießmaschine stark variieren. Dies wirkt sich auf die Prozessparameter und die Qualitätskriterien aus. Neben den Einflüssen der Restfeuchte auf die Bauteiloberfläche werden in dieser Arbeit auch die Einflüsse der Konditionierung auf die Fließeigenschaften und damit korrelierende Qualitätskriterien untersucht. Ein Vergleich zu Einflüssen aus Chargenschwankungen und Einflüssen durch Alterungseffekte über zeitabhängige Temperatureinflüsse führt zu einem neuartigen Ansatz der autonomen, adaptiven Prozessregelung.

## 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Problematik bei den angesprochenen Produktionsfehlern und Schnittstellen ist, dass die Feststellung von Qualitätsstörungen erst nach dem Spritzgießzyklus möglich ist. Bei Veredelungsprozessen wie der Galvanisierung gelingt dies sogar vielfach erst nachdem die Metalloberfläche auf das Kunststoffbauteil appliziert wurde. Aus diesem Grund ist die Zielsetzung dieser Arbeit die Quantifizierung der Störgrößen durch Chargen und Restfeuchteschwankungen auf die Materialeigenschaften und hieraus abgeleitet die Entwicklung einer

Prozesscharakterisierung zur Identifikation von Prozessschwankungen. In einem finalen Schritt werden die Ergebnisse der Material- und Prozesscharakterisierung in einer adaptiven Prozessregelung zur Sicherstellung konstanter Qualitätskriterien umgesetzt. Innerhalb dieser Arbeit wird neben dem quantifizierbaren Kriterium des Bauteilgewichtes in Korrelation zur Maßhaltigkeit auch die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile betrachtet.

Die Qualitätskriterien der Bauteile werden durch die Prozessführung der Einzelprozesse und die Materialeigenschaften bestimmt. Die Untersuchungen zu Prozess- und Produktqualität gliedern sich daher in die folgenden Schwerpunkte:

- Analyse der Einflüsse auf die Werkstoffeigenschaften,
- Modellbildung zur erweiterten Beschreibung des Materialverhaltens,
- Simulation des Spritzgießprozesses und Prozessbedingungen unter Einfluss der quantifizierten Störgrößen,
- Integration einer intelligenten, autonomen Regelstrategie in den Spritzgießprozess zur adaptiven Prozessregelung.

Angelehnt an diese Schwerpunkte wird der aktuelle Stand der Forschung und Technik in den Bereichen der Beschreibung des Materialverhaltens, der Modellbildung zur Prozesssimulation sowie der Prozessführung vorgestellt. Die Haupteinflüsse auf die Qualität einer Spritzgießproduktion können in Einflüsse über die Maschinenteknik, Regelstrategie und Prozessparameter eingeteilt werden. Des Weiteren sind Einflüsse aus dem Materialverhalten, Handling und der Produktionsumgebung zu beachten. Abschließend werden aktuelle Ansätze im Umgang mit Prozessschwankungen und Strategien zur Qualitätsregelung beim Spritzgießen vorgestellt. Eine Bewertung des aktuellen Kenntnisstandes schließt die jeweiligen Bereiche zum Stand der Forschung und Technik ab.

Aufbauend auf dem Stand der Technik werden prozessrelevante Materialeigenschaften und deren Veränderung im Aufbau von Polymeren über reversible und irreversible, chemische oder physikalische Reaktionen dargestellt. Anschließend werden Modelle zur Beschreibung des Materialverhaltens unter Einbindung der beschriebenen Einflussfaktoren diskutiert und eine erweiterter Modellansatz zur Integration von Einflüssen durch physikalische Strukturänderungen vorgestellt. Diese modellhafte Beschreibung ermöglicht die Abbildung der Einflüsse in der Prozesssimulation und Reaktionen qualitätsrelevanter Parameter. Ein Vergleich mit den Einflüssen aus Chargenschwankungen auf die Materialviskosität ist möglich. Ausgehend von den Einflüssen auf qualitätsrelevante Parameter können in der Simulationsumgebung Kompensationsstrategien entwickelt werden, die als Grundlage für die Integration einer adaptiven Prozessregelung dienen. Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Materialcharakterisierung und Simulation für eine gezielte Prozesscharakterisierung und Bezug der Störgrößen auf Qualitätsparameter im realen Spritzgießprozess genutzt. Zur Kompensation der Störgrößen wird eine neue Prozessregelung vorgestellt und anhand von Oberflächeneigenschaften sowie dem Bauteilgewicht als Qualitätskriterien validiert.

Begriffe und Fachtermini werden nach den in der angegebenen Literatur Definitionen verwendet. Für eine detaillierte Darstellung und Herleitung der Zusammenhänge für die Versuchsplanung und Auswertung soll an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen werden. Diese sind beispielsweise der folgenden Literatur [Br08, FSS11, GK08, Li11, ML07, Wo96] zu entnehmen. Die Begriffe aus dem Bereich des Spritzgießens werden nach [DI87] verwendet.

## 2 Prozessrelevante Materialeigenschaften von Polymeren

Eine mögliche Schwankungsursache im Spritzgießprozess wird über das Material und die Materialkonditionierung eingebracht. Innerhalb einer Produktion werden die Rohstoffeigenschaften in Spezifikationen und entsprechenden Toleranzgrenzen festgelegt. Eine der entscheidenden Größen für das Materialverhalten im Spritzgießprozess ist die Viskosität, „welche ein Maß für den inneren Widerstand des Werkstoffes gegen eine während des Fließens stetig wirkende Kraft darstellt“ [Mi06, SA06]. Hinzu kommen thermische Belastung, das Aufschmelzverhalten, Homogenisierung, bei teilkristallinen Kunststoffen das Kristallisationsverhalten sowie der werkstoffspezifische Zusammenhang zwischen spezifischem Volumen, Druck und Temperatur [GA05]. Technische Formmassen, wie *Polybutylenterephthalat* (PBT), *Polyamide* (PA), *Polycarbonat* (PC) oder *Acrylnitril-Butadien-Styrol* (ABS), neigen dazu, Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen [ABB98]. Daher müssen diese Polymere vor der Verarbeitung getrocknet werden. Hieraus ergeben sich qualitätsrelevante Einflüsse auf das Materialverhalten und demnach auch Einflüsse auf die Verarbeitung [Sc09, WS07, WSF08].

Die Fließeigenschaften von Polymeren werden in der Praxis beispielsweise durch den *Melt Flow Index* (MFI) nach DIN EN ISO 1133 charakterisiert, vom Rohstoffhersteller in einer entsprechenden Bandbreite garantiert und bei der Qualitätskontrolle am Wareneingang überprüft [DI12b, FHS07, KS08]. Der Vorteil liegt in dem sehr einfachen und schnellen Prüfverfahren. Allerdings gibt das Verfahren nur einen Punktwert auf der schergeschwindigkeitsabhängigen Fließkurve des Materials wieder und ist stark vom benutzerspezifischen Handling abhängig [Eh92]. Für eine detaillierte Abbildung des Fließverhaltens über einem größeren Schergeschwindigkeitsbereich muss auf die Untersuchung in einem *Rotationsrheometer* (RR) oder *Hochdruck-Kapillar-Viskosimeter* (HKV) zurückgegriffen werden [MH+11b]. Auf diese Weise ist eine Abbildung der Einflüsse durch Zeit, Temperatur und Scherbedingungen auf die Materialviskosität möglich. Hinzu kommen Einflüsse durch die Materialkonditionierung. Recyclatanteile oder Chargeneinflüsse spiegeln sich in den initialen Werkstoffeigenschaften je Materialprobe wieder.

Im Folgenden sollen die grundsätzlichen Annahmen über das rheologische und thermodynamische Verhalten von Polymeren vorgestellt werden. Dabei wird zuerst eine allgemeine Darstellung der Stoffgrößen und Zusammenhänge ohne die Berücksichtigung zeitabhängiger Reaktionen vorgenommen. Durch eine anschließende Beschreibung zeitabhängiger Alterungseinflüsse, wird die prozessrelevante Darstellung von Polymeren als reaktive Stoffsysteme mit unterschiedlichen Einflussfaktoren auf die chemische und physikalische Struktur eingeführt.

Des Weiteren werden beschreibende Modellansätze zur Abbildung des Materialverhaltens in mathematischen Funktionen vorgestellt. Diese stellen die Grundlage für die Beschreibung von Temperatur-, Zeit-, Restfeuchte- und Chargeneinflüssen auf die Materialeigenschaften dar. Bekannte Einflüsse durch das Alterungsverhalten von Polymeren sowie erweiterte Ansätze zur Integration in die materialbeschreibenden Modelle werden ebenfalls ausgeführt.

### 2.1 Kenngrößen zur Beschreibung der Materialeigenschaften

#### 2.1.1 Rheologisches Verhalten

Rheologie ist „die Wissenschaft von der Deformation und dem Fließen der Stoffe“ [PGL91]. Eine wichtige rheologische Kenngröße ist die Viskosität, als beschreibende Stoffgröße für das Fließverhalten eines Werkstoffes [DW99]. Bei der Beschreibung von Fluiden wird in Newtonsche Fluide und Nicht-Newtonsche Fluide unterschieden. Des Weiteren kann bei den Nicht-Newtonschen Fluiden in die Untergruppen mit dilatantem, plastischem, pseudoplastischem (oder strukturviskosem) und Ostwaldschem Fließverhalten unterschieden werden [Si09]. Diese Verhalten werden anhand der Viskosität charakterisiert und deren Abhängigkeit von der auf das Fluid wirkenden Dehnung oder Scherung in die resultierenden Dehn- oder Scherviskosität unterteilt

[DW99, GA05]. Für die Verarbeitung von Polymeren im Spritzgießprozess ist insbesondere die Scherviskosität von Bedeutung, die im Weiteren fokussiert betrachtet werden soll. Dabei ist die Schergeschwindigkeit, vielfach auch als Scherrate bezeichnet, die entscheidende Einflussgröße auf das Materialverhalten.

Bei der Betrachtung von Newtonschen Fluiden verhält sich die resultierende Schubspannung proportional zur aufgetragenen Schergeschwindigkeit. Der Proportionalitätsfaktor beschreibt die *dynamische Viskosität*  $\eta$  abhängig von der wirkenden *Schubspannung*  $\tau$  und *Schergeschwindigkeit*  $\dot{\gamma}$ . Für eine detaillierte Darstellung des Modells und der Ableitung von Schergeschwindigkeit und Schubspannung soll auf die in der weiterführenden Literatur dargestellten Grundlagen in [CR08, Eh11, GA05, MH+11b, Si09, SA06] verwiesen werden. Im Weiteren wird ausschließlich die Scherviskosität betrachtet, daher sind alle Angaben zur Viskosität auf die dynamische Scherviskosität zu beziehen.

Polymerschmelzen verhalten sich nicht rein Newtonsch, sondern pseudoplastisch oder strukturviskos. Makromolekulare Stoffe mit langen kettenartigen Molekülen, zeigen ein Newtonsches Verhalten nur bei sehr geringen Schergeschwindigkeiten. Der Bereich konstanter Viskosität wird als *Nullviskosität*  $\eta_0$  bezeichnet [MH+11b]. Bei der Betrachtung der Viskosität über der Schergeschwindigkeit in doppellogarithmischer Darstellung, sinkt die Viskosität progressiv bei steigender Schergeschwindigkeit. Die verschlungenen Makromoleküle lösen sich durch die eingebrachte Scherung und orientieren sich zunehmend in Fließrichtung [SK04]. Im Spritzgießprozess treten Schergeschwindigkeiten in einem sehr großen Variationsbereich auf, daher muss werkstoffspezifisch sowohl das Newtonsche als auch das strukturviskose Verhalten berücksichtigt werden.

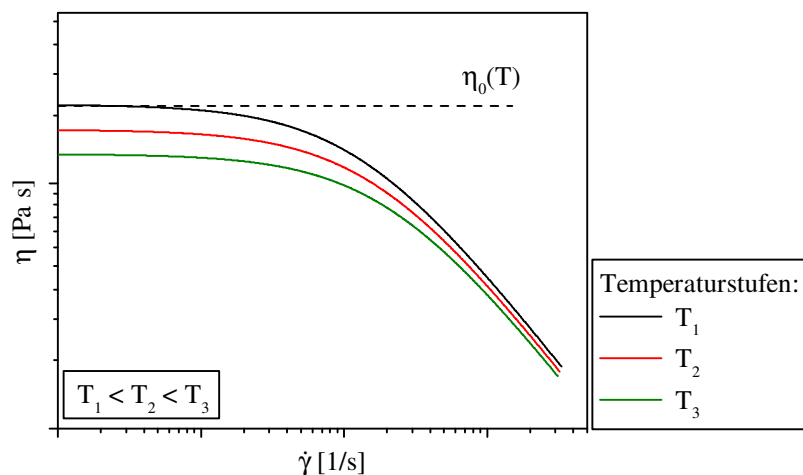


Abbildung 2-1 Dynamische Scherviskosität als Funktion der Schergeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Temperaturniveau

In Abbildung 2-1 ist eine beispielhafte Viskositätskurve einschließlich der Temperaturabhängigkeit in doppellogarithmischer Darstellung abgebildet. Die Abszissenachse zeigt die Schergeschwindigkeiten, auf der Ordinate ist die dynamische Viskosität aufgetragen. Bei strukturviskosen Fluiden ist die Viskosität folglich nicht konstant, sondern eine Funktion der Schergeschwindigkeit. Dadurch ergibt sich die Viskositätsfunktion zu Formel 2-1.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Formel 2-1 Schergeschwindigkeitsabhängige Viskositätsfunktion

Die Abhängigkeit der Viskosität von anliegenden Temperaturniveau ist beispielhaft für drei Temperaturstufen in Abbildung 2-1 dargestellt. Dabei bewirkt ein höheres Temperaturniveau eine Reduzierung der Viskosität über dem gesamten Schergeschwindigkeitsbereich.

Die Viskosität von Polymerschmelzen ist neben den äußeren Einflüssen durch den makromolekularen Charakter, chemischen Aufbau und der damit verbundenen Anordnung der Polymerketten sowie intermolekularen

Wechselwirkung über Dipol- und Wasserstoffbrückenbindungen geprägt. Dabei steigt mit zunehmendem Molekulargewicht und wachsender Kettensegmentlänge die Viskosität. Der Einfluss von Füllstoffen bezieht sich dabei hauptsächlich auf die physikalische Struktur und damit verbundenen Interaktion der Polymerketten untereinander. [CCD97, DW99, Eh11, MH+11b]

Die rheologischen Eigenschaften von Polymeren werden durch die in Tabelle 2-1 zusammengefassten Faktoren beeinflusst. Auf den Einfluss der Temperatur ohne Berücksichtigung zeitabhängiger Reaktionen wird in Kapitel 2.3.1 eingegangen.

Tabelle 2-1 Einflüsse auf das rheologische Verhalten von Polymeren nach [DW99]

<b>Fließbedingungen</b>	
Scherrate	Mit zunehmender Scherrate nimmt die Viskosität ab
Temperatur	Eine Erhöhung der Temperatur oberhalb der Glas- oder Kristallisationstemperatur erwirkt eine Vergrößerung des freien Volumens. Die Beweglichkeit der Kettensegmente wird erhöht und damit die Viskosität reduziert. Generell ist die Auswirkung der Temperatur bei amorphen Polymeren stärker als bei teilkristallinen. [MH+11b, Mi06, SK04]
Druck	Mit zunehmendem hydrostatischem Druck nimmt das freie Volumen in Polymerschmelzen ab und die Beweglichkeit der Kettensegmente wird reduziert. Im Vergleich zum Einfluss durch die Temperatur ist der Einfluss durch Druckveränderungen gering. [Eh11, RO98]
<b>Zusammensetzung des Polymers</b>	
Chemische Struktur	Die Abhängigkeit von der chemischen Struktur kann in die folgenden Bereiche unterteilt werden: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorhandensein von langen, verzweigten Molekülketten,</li> <li>- Art und Konzentration von Additiven und Füllstoffen,</li> <li>- Molekulargewichtsverteilung.</li> </ul>

Die bisherige Darstellung betrachtet Polymer als Systeme, bei denen keine zeitabhängigen Reaktionen ablaufen. Allerdings sind insbesondere unter dem Gesichtspunkt prozessrelevanter Alterungseffekte temperatur- und zeitabhängige Reaktionen mit Einfluss auf die chemische Struktur der Polymere zu beachten. Hinzu kommen Einflüsse über Additivierung und Konditionierung, die sowohl die chemische als auch physikalische Struktur des Polymers und zeitabhängige Reaktionen beeinflussen. Polymere sind damit als reaktive Systeme einzustufen. Auf diese unter dem Begriff der Alterung zusammengefassten Reaktionen wird in Kapitel 2.2 sowie Kapitel 4 detailliert eingegangen

### 2.1.2 Thermodynamisches Verhalten

Neben der Viskosität, sind in Bezug auf das thermodynamische Verhalten die *spezifische Wärmekapazität*  $c_p$ , die *Wärmeleitfähigkeit*  $\lambda$  sowie das dynamische Verhalten des *spezifischen Volumens*  $v$  bei der Betrachtung von Polymeren von Bedeutung. Dabei ist die Wärmeleitfähigkeit „ein Maß für die Fähigkeit eines Stoffes, bei vorgegebenen Temperaturgefällen Wärmeströme zu transportieren“ [Wo96]. Auch diese Materialkennwerte ist die Abhängigkeit von Druck und Temperatur zu berücksichtigen. Das dynamische Verhalten des spezifischen Volumens unter Druck- und Temperatureinfluss wird unter dem Begriff des *pVT-Verhaltens* zusammengefasst.

Im Gegensatz zu Metallen kann bei Polymeren die Wärme nicht über freie Elektronen übertragen werden. Aus dieser Eigenschaft resultiert das gute Isolationsvermögen der Polymere. Wärme kann nur über die kovalenten Bindungen und die Nebervalenzkräfte übertragen werden, die Energie wird durch Schwingungen der Kettenmoleküle transportiert. Die drei grundsätzlichen Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit sind die zunehmende Beweglichkeit des Materialgefüges mit steigender Temperatur, die Zunahme des spezifischen Volumens mit steigender Temperatur und stoffliche Inhomogenität. Diese grundsätzlichen Einflussbereiche lassen sich weiter aufspalten, sodass die Einflussfaktoren auf die Wärmeleitfähigkeit bei teilkristallinen Thermoplasten auf Änderung des Massedruckes, des Kristallinitätsgrads, der Orientierung der Moleküle, des Molekulargewichts sowie auf Füllstoffe zurückgeführt werden können. [BHB92, MH+11b, OH06]

Für die Verarbeitung von Polymeren im Spritzgießprozess sind das dynamische  $p-v-T$ -Verhalten und die damit verbundene Charakterisierung von Schwindung unter Druck- und Temperatureinfluss entscheidend. Das Volumen eines einfrierenden, amorphen Stoffes ändert sich sowohl über, als auch unter der *Einfriertemperatur*  $T_G$  linear, jedoch mit unterschiedlichen Steigungen. Mit zunehmender Temperatur nimmt das freie Volumen zwischen den Kettensegmenten zu, somit steigt das spezifische Volumen. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Druck. Mit steigendem Druck nimmt das freie Volumen ab. Schematische Verläufe des spezifischen Volumens bei zunehmendem Druck sowie Temperatureinfluss sind in Abbildung 2-2 dargestellt. [MH+11b, ROE11]

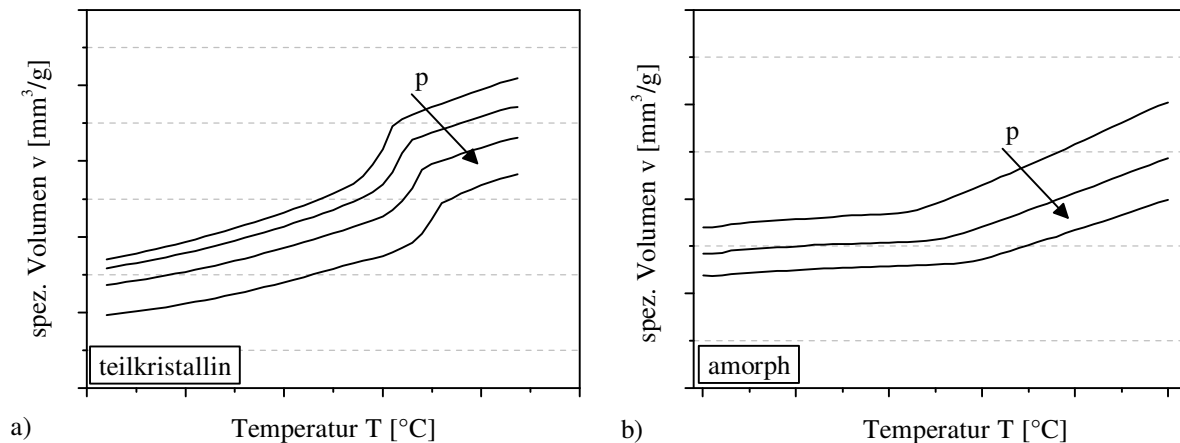


Abbildung 2-2 Schematischer Verlauf des spezifischen Volumens unter Druck- und Temperatureinfluss für a) teilkristalline und b) amorphe Thermoplaste

Für teilkristalline Polymere wird der Übergangsbereich vom Schmelzzustand in den eingefrorenen Zustand durch den Temperaturbereich zur Bildung der kristallinen Strukturen geprägt. Auf die Lage des Übergangsbereiches hat insbesondere die Abkühl- oder Aufheizrate einen entscheidenden Einfluss [Mo99, VPM05]. Dies kann anhand der spezifischen Wärmekapazität dargestellt werden [Wu05]. Die Wärmekapazität ergibt sich dabei aus dem Quotienten der zugeführten Wärme und der Temperaturerhöhung im Aufheizprozess beziehungsweise aus dem Quotienten der abgeführten Wärme und der resultierenden Temperaturabnahme.

Die spezifische Wärmekapazität ändert sich über dem Temperaturbereich bei Gebrauch nur geringfügig. Bei amorphen Thermoplasten ist auch bei der Verarbeitung nur eine geringe Änderung festzustellen. Amorphe Thermoplaste zeigen eine mit fallender Temperatur stetig abnehmende Wärmekapazität. Die Bildung oder Auflösung von kristallinen Strukturen führt jedoch bei teilkristallinen Thermoplasten zu einer Besonderheit innerhalb des Phasenübergangs der Polymerstruktur, die innerhalb des verarbeitungsrelevanten Temperaturbereiches berücksichtigt werden muss. Bei der Betrachtung eines Abkühlprozesses ist für teilkristalline Thermoplaste im Bereich des Phasenübergangs eine erhöhte abgeführte *Wärmestrom*  $\dot{q}$  während der Bildung der Kristalle notwendig. Allerdings findet in dieser Phase keine direkte Temperaturabnahme bei der Bildung der kristallinen Strukturen statt. In Abbildung 2-3 ist die *spezifische* Wärmekapazität  $c_p$  für einen Abkühlprozess eines teilkristallinen sowie amorphen Thermoplasten exemplarisch dargestellt. [ERT03, Wu05]

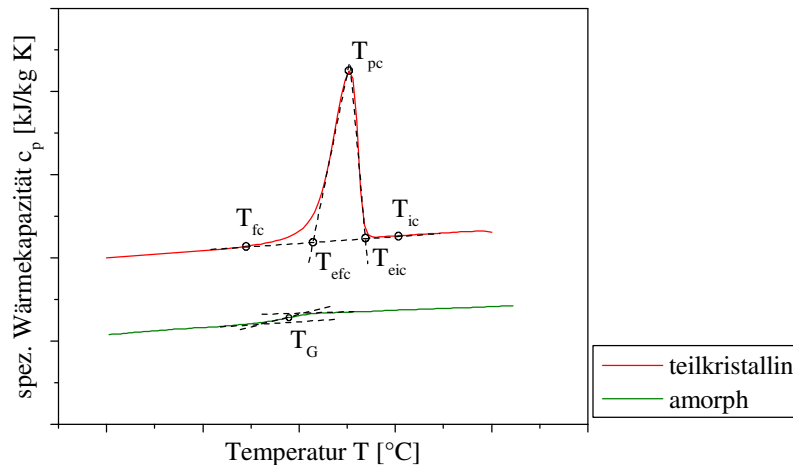


Abbildung 2-3 Wärmekapazität über der Temperatur für amorphe und teilkristalline Thermoplaste

Zu den charakteristischen Merkmalen einer Kristallisationskurve zählen die folgenden Punkte [DI13, ERT03]:

- Anfangstemperatur  $T_{ic}$ ,
- extrapolierte Anfangstemperatur  $T_{eic}$ ,
- Peaktemperatur  $T_{pc}$ ,
- extrapolierte Endtemperatur  $T_{efc}$ ,
- Endtemperatur  $T_{fc}$ .

Der Peak der Kristallisationskurve in Abbildung 2-3 ist abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit. Mit steigender Abkühlrate verschiebt sich  $T_{pc}$ , der Punkt maximaler Kristallisationsgeschwindigkeit, hin zu niedrigeren Temperaturen. Außerdem wird der Temperaturbereich, in dem Kristallisation stattfindet, verbreitert. Für amorphe Thermoplaste ist insbesondere die Glasübergangstemperatur  $T_G$  von Bedeutung. Aus dem integrierten Wärmestrom kann die kunststoffspezifisch notwendige *Enthalpieänderung*  $\Delta H_c$  zum Aufschmelzen oder Abkühlen innerhalb eines entsprechenden Temperaturintervalls bestimmt werden. Für eine detaillierte Darstellung der Kenngrößen zur Beschreibung von Werkstoffeigenschaften soll auf die angegebene Fachliteratur verwiesen werden. [Eh11, ERT03]

Die dargestellten Zusammenhänge werden bei der Modellbildung zur Simulation des Spritzgießprozesses wieder aufgegriffen. Hierbei wird insbesondere der Zusammenhang des  $pVT$ -Verhaltens und der Abkühlrate als Einfluss auf die Kristallisation sowie die Glasübergangstemperatur betrachtet.



## 2.2 Alterung von Polymeren

Unter dem Begriff Alterung wird bei polymeren Werkstoffen die „Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge“ zusammengefasst [DI12a, Eh11]. Bei der Betrachtung von Eigenschaftsänderungen müssen außerdem reversible Vorgänge beachtet werden. Unter dem Begriff „physikalische Alterung“ werden dabei mitunter (thermisch) reversible Veränderungen der polymeren Werkstoffstruktur bezeichnet [DI12a]. Bei der Beständigkeit von Polymeren wird in das Verhalten während der Verarbeitung und das Verhalten im Gebrauch differenziert [Wo96]. Im Folgenden wird auf die Beständigkeit von Polymeren und die Einflüsse auf das Materialverhalten während der Verarbeitung der Fokus gelegt, da in dieser Phase maßgeblich die geforderten Qualitätskriterien und späteren Produkteigenschaften beeinflusst werden. Dabei ist die Konditionierung als Ausgangszustand für die Verarbeitung zu betrachten, und definiert den Zustand des Materials in Bezug auf den Restfeuchteanteil sowie zeit- und temperaturabhängige Reaktionen während der Trocknung.

Allgemein wird bei Polymerwerkstoffen nach inneren und äußeren Alterungsursachen unterteilt [BBC90]. Des Weiteren werden bei Alterungsvorgängen die Untergruppen chemische, physikalische und physikalisch-chemische Alterungsvorgänge unterschieden. Die Unterteilung der Alterungsvorgänge und Alterungsursachen sind in Abbildung 2-4 zusammengefasst. [BBC90, MK05, Ng05]

Inneren Alterungsursachen sind thermodynamisch instabile Zustände des Materials, beispielsweise Spannungen durch Molekülorientierungen, die nach der Verarbeitung relaxieren. Äußere Alterungsursachen sind chemische und physikalische Einwirkungen durch die Umgebungsbedingungen, beispielsweise Luftfeuchtigkeit, UV-Strahlung und Sauerstoffkonzentration [Do78]. Veränderungen im chemischen Aufbau, die zu einer Reduzierung der Polymerkettenlänge führen, werden auch als Degradation bezeichnet. Reaktionen, die einen Aufbau der Polymerketten bewirken, sind mit den Begriffen Nachkondensation oder Nachpolymerisation definiert. Des Weiteren kann die Bildung von Verzeigungen auftreten. [CCJ06, EP07, HAM92, Po00]

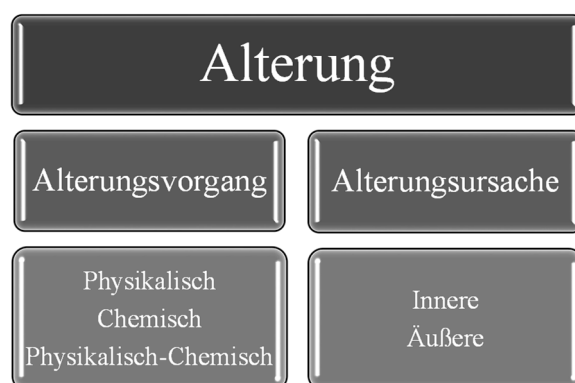


Abbildung 2-4 Kategorisierung von Alterung bei Polymerwerkstoffen

**Physikalische** Alterung resultiert aus Änderungen des thermodynamischen Zustands des Systems und dem Streben nach einem Gleichgewichtszustand. Bei der Verarbeitung werden die Molekülketten der Polymere ausgerichtet und inhomogen abgekühlt. Aus den eingefrorenen Orientierungen resultieren innere Spannungen, die mit der Zeit relaxieren. Alle Vorgänge, die eine Veränderung des Gefüges, des Ordnungszustandes der Moleküle oder der äußeren Form und Struktur sowie der messbaren physikalischen Eigenschaften bedingen, werden als physikalische Alterungsvorgänge bezeichnet [Hu95]. Die wichtigsten Vorgänge sind dabei Relaxation, Nachkristallisation sowie Entmischung, Weichmacherwanderung und Agglomeration [EP07]. Physikalische Alterung und die damit verbundenen strukturellen Änderungen sind reversible Vorgänge. [Se11]

**Chemische** Alterungsvorgänge beschreiben alle Vorgänge, bei denen die chemische Zusammensetzung sowie die Molekülstruktur des Polymers verändert werden. Wichtige Reaktionen sind dabei Oxidation, Kettenabbau, Hydrolyse, Nachkondensation und Nachpolymerisation [Ce13, Po00]. Der chemische Alterungsvorgang ist irreversibel und wird durch verschiedene Umgebungsparameter initiiert. [CC06, HAM92, KJ+10]

Zu den **physikalisch-chemischen** Alterungsvorgängen zählt die Diffusion mittelgroßer Moleküle aus dem Polymer oder in die Polymermatrix. Dies können beispielsweise Additive sein, die aus dem Werkstoff oder in Form von beispielsweise Wasser in das Polymer hinein diffundieren. [MK05]

Auf Grund der komplexen Zusammensetzung der Einflussfaktoren auf ein Polymer während der Verarbeitung sind die Ursachen für eine Veränderung des Materialverhaltens ebenso vielschichtig. Die vorgestellten Vorgänge überlagern sich oder laufen parallel ab. Entscheidende Einflussfaktoren auf die Alterung von Polymeren stellen Temperatur, Zeit, Sauerstoffkonzentration und Restfeuchteanteile im Material da [DKM12, DPE99]. Dabei laufen vielfach Prozesse der inneren Alterungsursachen bereits bei Raumtemperatur ab. Die Temperatur selber ist kein direkt auslösender Faktor dieser Prozesse, sondern bewirkt vielmehr eine Beschleunigung mit zunehmender Temperatur. Im Folgenden werden die vorgestellten Ursachen für eine Veränderung des Materialverhaltens in Bezug auf eine Verarbeitung beim Spritzgießen diskutiert. [KJ+10, Po00, PDE00, Wh06, ZGB97]

### **2.2.1 Chemische Strukturänderungen durch thermisch induzierte Kettenlängenänderung**

Kovalente Bindungen können durch Energiezufuhr entsprechend ihrer Bindungsenergie gelöst werden. Eine Energiezufuhr in Form von thermischer Energie durch hohe Temperaturen kann diese Abbaureaktion initiieren. Die thermische Kettenspaltung findet an schwachen Bindungsstellen der Molekülketten, wie beispielsweise Verzweigungen, statt. Bei Polymerketten werden die Haupt- und Nebensegmente gespalten und damit die Kettenlänge und Mol-Masse beeinflusst. Gleichzeitig kann es zur Bildung niedermolekularer Abbauprodukte kommen [Po00, PDE00]. Dabei bedingt eine Temperatursteigerung direkt eine erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit. Es wird bei rein thermischen Abbaureaktionen zwischen der statistischen Kettenspaltung mit Abnahme der Mol-Masse ohne Bildung von niedermolekularen Verbindungen, der Depolymerisation mit Monomerbildung ohne wesentliche Änderung der Mol-Masse sowie der Eliminierung mit Abspaltung von Seitengruppen und der Bildung niedermolekularer Verbindungen unterschieden [EP07]. Eine polymerspezifische Überlagerung der Reaktionen ist möglich.

Polymerspezifisch können Degradationseffekte zeitabhängig innerhalb des Verarbeitungstemperaturbereiches auftreten [CV06]. Bei [LO+73] wurde bereits die Degradation von Polyestern durch eine Umesterung, Kettenspaltung und damit Verringerung der Mol-Masse abhängig von Zeit und Temperatur beschrieben. Außerdem treten bei linearen Polymeren neben der Spaltung der Molekülketten auch zum Teil Vernetzungsreaktionen und Nachkondensation auf, was eine Erhöhung der Mol-Masse nach sich zieht [MW+12]. Dies ist insbesondere bei Polyamiden bekannt.

### **2.2.2 Chemische Strukturänderungen durch thermisch-oxidativen Abbau**

Unter der Voraussetzung, dass Sauerstoff für die Reaktion zur Verfügung steht, kommt es zu thermisch-oxidativem Abbau. In niedrigen Temperaturbereichen tritt bei technischen Polymeren noch kein rein thermischer Abbau auf, deshalb sind oxidative Reaktionen in diesem Temperatursegment von Bedeutung [Po00]. Bei diesen Reaktionen wird durch die Bildung von Oxidationsprodukten die Zusammensetzung des Polymers verändert [Em85]. Dabei kann in die drei Mechanismen Kettenspaltung, Vernetzung und Verzweigung von Molekülketten unterschieden werden [EP07]. Der Sauerstoffanteil im Plastifizieraggregat einer Spritzgießmaschine ist jedoch als vernachlässigbar gering einzustufen, so dass diese Reaktionen keine entscheidende Rolle bei der Betrachtung von Einflüssen innerhalb der Verarbeitung spielen [JM04].

### **2.2.3 Chemische Strukturänderungen durch hydrolytischen Abbau**

Von hoher Prozessrelevanz ist, insbesondere für Polykondensate, der hydrolytische Abbau unter Temperatureinfluss. Diese Reaktionen vollziehen sich vornehmlich bei Polymeren mit hydrolysierbaren Gruppen, wie Ester-, Amid- oder Nitrilgruppen in den Hauptketten [Do78, LO+73]. Zu diesen Polymeren gehören beispielsweise Polycarbonat, Polyamide und die Gruppe der Polyester. Durch Hydrolyse kommt es zu einer Aufspaltung dieser Gruppen und einer Reduktion der Mol-Masse. Die Konzentration des zur Verfügung stehenden

Wassers beeinflusst direkt die Hydrolysegeschwindigkeit. Säuregruppen, die bei der Hydrolyse entstehen, und hohe Temperaturen beschleunigen zusätzlich den Abbauprozess. Insbesondere bei der Verarbeitung von hygroskopischen, nicht getrockneten Polymeren muss hydrolytischer Abbau berücksichtigt werden. Dies beeinflusst direkt die Viskosität sowie andere prozess- und qualitätsrelevante Eigenschaften des Werkstoffes. Aus diesem Grund werden für kritische Materialien Verarbeitungsgrenzen für den Restfeuchtegehalt angegeben. [EP07, JM04]

## 2.2.4 Physikalische Strukturänderungen und mechanischer Abbau

Der Einfluss von Restfeuchte zeigt sich in der Verarbeitung durch eine Änderung der Fließeigenschaften. So kann die Anwesenheit von Feuchtigkeit wie ein Weichmacher wirken. Dabei genügt bereits ein geringer Anteil an Restfeuchte, um einen merklichen Abfall der Viskosität zu verursachen. Dies kann ebenfalls auf eine Veränderung im physikalischen Gefüge durch eingelagerte Wassermoleküle zwischen den Polymerketten zurückgeführt werden und ist nicht zwangsläufig auf hydrolytische Effekte zurückzuführen. Eine detaillierte Identifikation des Alterungsmechanismus im Zusammenhang mit Restfeuchtigkeit im Spritzgießprozess ist bisher nicht bekannt. Eine Unterscheidung zwischen chemischen und physikalischen Einflüssen im Prozess ist nicht möglich. [Jo04, JM04, Sc09, WSF08]

Physikalisch entstehen durch den Einfluss der Temperatur und der mechanischen Belastung reversible Änderungen der Struktur des Polymers [EP07]. So ändern sich das freie Volumen und damit auch das Ausdehnungsverhalten von Kunststoffen. Die Änderung des Ausdehnungsverhaltens führt zu Dimensionsänderungen, die in mechanischen Spannungen im Material resultieren. Diese Spannungen können zu Rissbildung oder Brüchen führen. Risse können auch durch Nachkristallisation entstehen, da die Steigerung des Kristallisationsgrades zu einer Volumenabnahme führt. Die Einflüsse von physikalischen Strukturänderungen sind bisher nur für das Langzeitverhalten direkt zugeordnet. Eine Identifikation von durch physikalische Strukturänderungen beeinflussten Viskosität ist nicht bekannt. Diese steht in direktem Bezug zum Restfeuchtegehalt und der bereits angesprochenen Veränderung der Ketteninteraktion durch gebundene Wassermoleküle. Eine detaillierte Betrachtung und Diskussion vom prozessrelevanten Einfluss von Restfeuchtigkeit auf die chemische und physikalische Struktur sowie dem Materialverhalten wird in Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4 dargestellt. [FH+08, HP04, IN08]

Während der Verarbeitung wirken sich zusätzlich zu den Einflussfaktoren der Temperatur, des Sauerstoffes, der chemischen und physikalischen Struktur außerdem die mechanische Belastung auf die Alterung von Polymeren aus. Durch die Belastung im Plastifizieraggregat und im Werkzeug werden die Polymerketten stark beansprucht. Die Stärke der Beanspruchung hängt von der Kettenlänge und der Höhe der Dehn- sowie Schubspannungen ab und kann zu einer Reduzierung der Kettenlänge führen. Bei Spritzgießprozessen ist die explizite Auswirkung der mechanischen Belastung nicht bekannt. Die mit der Deformation gekoppelte dissipative Erwärmung lässt sich nicht von der mechanischen Belastung getrennt betrachten und muss in Bezug auf thermische Abbauprozesse berücksichtigt werden [JM04]. Durch Scherung können sich außerdem Radikale und peroxidische Gruppen bilden, die bereits bei niedrigen Temperaturen zu den beschriebenen Abbaureaktionen und damit einer Veränderung der Mol-Masse führen [Sc95].

## 2.3 Modellierung der Materialeigenschaften

Bei der Betrachtung des Materialverhaltens von Polymeren ist insbesondere das Fließverhalten unter Schereinflüssen von Bedeutung für die Verarbeitung. Die Beschreibung der Scherviskosität von Polymeren kann durch verschiedene mathematische Ansätze dargestellt werden, die eine Abbildung des materialspezifischen Verhaltens unter gegebenen Einflüssen ermöglichen. In den folgenden Abschnitten werden mathematische Modelle vorgestellt, die sich mit der detaillierten Beschreibung des strukturviskosen Materialverhaltens befassen. Die Modelle ermöglichen eine gezielte Beschreibung der Effekte, die das Fließverhalten von Polymeren beeinflussen können und bilden die Grundlage für die numerische Simulation des Formteilbildungsprozesses. Die beiden gebräuchlichsten Ansätze sind der „Potenzansatz nach Ostwald und de Waele“ sowie der „Carreau-Ansatz“ [MH+11b]. Für eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Ansätze, die Herleitung der mathematischen Formulierung und deren Anwendung wird auf die folgende Literatur [Ca68, Ca72, CR08, DW99, Ke07, MK96, MH+11b, OH06, PGL91, Si09, SA06] verwiesen.

### 2.3.1 Das Carreau-Model und Ansätze zur Integration von Temperatureinflüssen

Ein Modell, das für einen großen Schergeschwindigkeitsbereich das Newtonsche und strukturviskose Fließverhalten von Polymeren beschreiben kann, ist der Carreau-Ansatz [OH06]. Der Newtonsche und strukturviskose Bereich können nach [Ca72] und [CCD97] über das in Formel 2-2 angegebene Drei-Parameter-Modell dargestellt werden.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{(1 + (t_1 \cdot \dot{\gamma})^2)^{\frac{(n-1)}{2}}}$$

Formel 2-2      Formulierung des Carreau-Ansatz nach [Ca72]

Die Darstellung des Carreau-Ansatzes nach [MH+11b] ist insbesondere im deutschsprachigen Raum und innerhalb der Prozess- und Materialmodelle von Simulationsumgebungen gebräuchlich. Daher wird im Weiteren für die Modellentwicklung die Formulierung nach Formel 2-3 verwendet.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^c}$$

Formel 2-3      Formulierung des Carreau-Ansatz nach [MH+11b]

Ein großer Einfluss auf die Viskosität von Polymerschmelzen geht von der Temperatur aus. Dies wurde bereits in der allgemeinen Darstellung der Viskositätskurve als Funktion der Schergeschwindigkeit in Abbildung 2-1 für drei Temperaturniveaus gezeigt. Um die Abhängigkeit von der Temperatur in die mathematische Beschreibung des Fließverhaltens zu integrieren, wird der Carreau-Ansatz zu Formel 2-4 um den *Temperaturverschiebungsfaktor*  $a_T$  erweitert.

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{A \cdot a_T(T)}{(1 + B \cdot a_T(T) \cdot \dot{\gamma})^c}$$

Formel 2-4      Carreau-Ansatz unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Viskosität

Deutlich oberhalb der Glastemperatur lässt sich der Temperatureinfluss auf die Viskositätskurven von teilkristallinen Thermoplasten durch den Arrhenius-Ansatz gut beschreiben. Diesem Ansatz liegt die Annahme zu Grunde, dass bei steigender Temperatur die Beweglichkeit der Molekülketten zunimmt und somit der Fließwiderstand der Schmelze sinkt. Der Arrhenius-Ansatz beschreibt die Änderung der Nullviskosität abhängig von einer Temperaturänderung bezogen auf eine Referenztemperatur  $T_0$ . Die Betrachtung nach Formel 2-5 ist dabei auf rein thermisch aktivierte Platzwechselprozesse der Moleküle referenziert. [MH+11b]

$$\eta_0(T) = \eta_0(T_0) \cdot e^{\frac{E_0}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Formel 2-5      Arrhenius-Ansatz zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Viskosität

Der Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$  ergibt sich aus dem Verhältnis der temperaturabhängigen Nullviskositäten.

$$\log a_T = \log \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} = \frac{E_0}{R} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Formel 2-6 Temperaturverschiebungsfaktor  $a_T$

Für amorphe Thermoplaste kann alternativ im Bereich der Glasübergangstemperatur der Ansatz nach [WLF55] zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit verwendet werden. Diese alternative Betrachtung der temperaturabhängigen Viskositätsunterschiede wird auf Grundlage des freien Volumens durchgeführt. Die hierdurch bestimmte Wahrscheinlichkeit für molekulare Platzwechselvorgänge wird nach [MH+11b, WLF55] für die Temperaturabhängigkeit der Viskosität nach Formel 2-7 verwendet.

$$\log a_T = \log \frac{\eta(T)}{\eta(T_S)} = - \frac{C_1 \cdot (T - T_S)}{C_2 + (T - T_S)}$$

Formel 2-7 WLF-Ansatz zur Beschreibung des Temperaturverschiebungsfaktors

Die Parameter  $T_S$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  sowie die im Arrhenius-Ansatz integrierte *materialspezifische Fließaktivierungsenergie*  $E_0$  sind über die Analyse gemessener Fließkurven zu bestimmen. Vielfach kann  $T_S \approx T_E + 50^\circ\text{C}$  angenommen werden. Der Druckeinfluss auf die Viskosität der Polymerschmelze kann noch berücksichtigt werden, indem die *Standardtemperatur*  $T_S$  im WLF-Ansatz als Funktion des Druckes eingesetzt wird. Bei steigendem Druck steigt auch die *Erweichungstemperatur*  $T_E$  an. Dieser Zusammenhang kann bis zu Drücken von 1000 bar als linear angenommen werden, ist aber als eher gering einzuschätzen. [Ehl1, MH+11b]

Dieser erweiterte Carreau-Ansatz berücksichtigt eine temperatur- und druckabhängige Verschiebung der Viskositätskurve, allerdings noch keine Effekte durch chemische oder physikalische Änderungen der Materialeigenschaften.

### 2.3.2 Der Strukturänderungsfaktor

Die bereits diskutierten Effekte durch Alterung von Polymeren und die damit einhergehende Änderung der Viskosität sind bisher nicht in den beschreibenden Modellansätzen enthalten. Modelle zur Beschreibung des Alterungsverhaltens sind aktuell nur für mechanische Eigenschaften bekannt [Wa88]. Bei *Mielicki* [Mi14] wird erstmals ein Faktor beschrieben, der die Langzeiteinflüsse durch Temperatur auf die Viskosität und damit das die Nachkondensation von *Polyamid 12* (PA 12) darstellt. Dabei wird werkstoffspezifisch eine exponentielle Wachstumsfunktion zu Grunde gelegt, die auf der Temperaturabhängigkeit thermisch induzierter molekularen Platzwechsel, beschrieben durch den Arrhenius-Ansatz, basiert. Die strukturellen Änderungen im Aufbau der Polymerketten durch die zeit- und temperaturabhängige Nachkondensationsreaktion werden mit dem *Strukturänderungsfaktor*  $a_{SC}$  nach Formel 2-8 beschrieben.

$$a_{SC}(t, T) = a_{SC,UL} - (a_{SC,UL} - 1) \cdot \exp \left( -k_0 \sum t_i \cdot \exp \left( -\frac{E_{0,SC}}{R T_i} \right) \right)$$

Formel 2-8 Strukturänderungsfaktor  $a_{SC}$  nach [Mi14]

Die Formulierung beschreibt eine Zunahme der Mol-Masse in Folge von Kettenlängenänderungen. Dabei wird über die integrierte Summenfunktion eine Unterscheidung in die Einflüsse mehrerer Temperaturstufen  $T_i$  und entsprechenden Zeiteinheiten  $t_i$  ermöglicht. Der Strukturänderungsfaktor kann in den Carreau-Ansatz integriert werden und beschreibt damit die Viskosität unter Einfluss von temperatur- und zeitabhängigen Alterungsphänomenen.

$$\eta(\dot{\gamma}, t, T) = \frac{A \cdot a_T(T) \cdot a_{SC}(t, T)}{(1 + B \cdot a_T(T) \cdot a_{SC}(t, T) \cdot \dot{\gamma})^C}$$

*Formel 2-9      Zeit- und temperaturabhängige Carreau-Gleichung zur Beschreibung der Viskosität*

Für eine detaillierte Darstellung und Diskussion der Formelelemente soll auf die Entwicklung und Validierung des Ansatzes in [Mi14, MGW12, MGW13, MW+12] verwiesen werden. Effekte durch hydrolytischen Abbau und physikalische Effekte bei Restfeuchteanteilen wurden nicht untersucht. Außerdem beziehen sich bisherige Modellansätze zur Beschreibung von Alterungseffekten in Relation zu Zyklus- und Verweilzeiten nur auf Langzeiteinflüsse, jedoch nicht auf das Kurzzeitverhalten im Spritzgießprozess.

## 2.4 Simulation des Spritzgießprozesses

Basierend auf den Modellen zur Beschreibung des Materialverhaltens können aktuelle Simulationsumgebungen die Formfüllung und Nachdruckphase beim Spritzgießen berechnen. Das strukturviskose Fließverhalten und Einflüsse durch Temperaturänderung, werden durch die dargestellten Ansätze anhand von Messdaten hinterlegt. Als tabellarische Messgrößen werden die hinterlegten Materialeigenschaften mit einer definierten Anzahl von Stützstellen entsprechend der beschreibenden Modelle diskretisiert. Selbiges gilt für das dynamische  $p\dot{v}T$ -Verhalten, das beispielsweise mit dem „two domain modified tait model“ abgebildet wird [DM88, LR+01]. Bei der Abbildung des  $p\dot{v}T$ -Verhaltens ist insbesondere der Einfluss der Kühlrate bedeutend, die Einflüsse auf das Kristallisationsverhalten wurden bereits in Kapitel 0 diskutiert [VPM05, ZPM01].

Um die Einflüsse durch Veränderungen im Materialverhalten in einer Simulation abbilden zu können, ist eine detaillierte Modellbildung und hochauflösende Messung des Materialverhaltens notwendig [Dö12]. Variierende Materialdaten führen dank einer zunehmend präzisierten Berechnung der Prozessabläufe zu entsprechend variierenden Ergebnissen in der Simulation. Die Randbedingungen bei der Materialdatenerfassung wirken sich direkt auf die Simulationsergebnisse aus [EGW04, Mo99]. Hinsichtlich des Materialverhaltens ist festzuhalten, dass in Simulationen bereits viele Eigenschaften hinterlegt werden können und deren Einfluss berücksichtigt werden kann. Beispiele hierfür sind das über das  $p\dot{v}T$ -Verhalten abgebildete Schwindungs- und Verzugverhalten. Es existieren jedoch weitere wichtige Kenngrößen, wie beispielsweise Eigenspannungen und Kristallisationsgefüge, die in der Regel vernachlässigt werden, da sie nur schwer zu beschreiben sind [HAB11].

Neben der mathematischen Beschreibung des Materialverhaltens ist die Prozessabbildung und das hinterlegte Prozessmodell ein wichtiger Bestandteil der Simulation. Beim aktuellen Stand der Technik gibt es bei der numerischen Modellierung des Spritzgießprozesses keinen Ansatz, der das Fließverhalten einer Polymer-schmelze ohne vereinfachende Annahmen, beispielsweise hinsichtlich Kompressibilität, abbildet [TK09]. Da die Effekte der Kompressibilität auf das Fließverhalten im Gegensatz zur Einspritzgeschwindigkeit klein sind, wird bei Simulationsprogrammen der Füllvorgang oft inkompressibel berechnet [IH01]. Eine kompressible Berechnung findet erst im anschließenden Nachdruckbereich statt. Die beiden Prozessphasen sind klar durch das Umschaltkriterium voneinander getrennt. Allerdings führen die unterschiedlichen Modellansätze zu Schwankungen beim Übergang von der inkompressiblen Füllphase zur Nachdruckphase. Dies wird durch weitere Rahmenbedingungen, wie eine Vorgabe maximaler Drucksteigerungen, versucht zu kompensieren.

Trotz dieser Einschränkungen ist die Verwendung von Simulationssoftware zur Bestimmung von Prozesseinflüssen ein vielversprechender Ansatz. Aktuell werden Softwarelösungen bereits zur Auslegung und Optimierung von Werkzeugen und Kühlung eingesetzt, oder um die notwendigen Maschinenparameter in einem gewissen Rahmen vor der Produktion bestimmen zu können. Die Simulation konkreter Qualitätsparameter ist nur eingeschränkt möglich. Trotzdem können aus der Simulation qualitative Zusammenhänge abgeleitet werden, die im Spritzgießprozess nicht direkt erfasst werden können. Dabei sind Ansätze verfügbar, die eine Beschreibung der späteren Bauteileigenschaften im Hinblick auf das Kristallisationsgefüge, anisotrope mechanische Eigenschaften resultierend aus der Molekülorientierung oder gegebenenfalls Faserorientierung ermöglichen. Auch die Kombination verschiedener Werkstoffe in mehrstufigen Prozessen sowie deren Verbindung im Bauteil kann nach dem aktuellen Stand der Technik abgebildet werden. Eine Simulation von Prozesseinflüssen durch Chargeneinflüsse, Alterungseffekte oder der Materialkonditionierung findet bisher nicht statt. [EZ+11, Gr13, Re01, Wi03]

## 2.5 Bewertung des Kenntnisstandes

Der aktuelle Kenntnisstand bei der Beschreibung von Alterungseffekten bei Polymeren ist in Bezug auf die chemischen Vorgänge und Langzeiteffekte sehr umfassend. Die chemischen Vorgänge sind zum Teil mit Bezug zu den Verarbeitungsprozessen untersucht worden und können Störungen im Prozessablauf erklären. In Kombination mit dem erweiterten Modellansatz zur Beschreibung des Materialverhaltens ist eine Prognose zum Fließverhalten unter Zeit- und Temperatureinfluss möglich. Allerdings finden sich keine Untersuchungen zu den Einflüssen von Restfeuchte auf das Werkstoffverhalten technischer Polymere. Die Auswirkungen dieser Variationen in der Materialkonditionierung sind aus Prozessbetrachtungen bekannt, eine gezielte Analyse zur Begründung des Werkstoffverhaltens findet nicht statt. Die Übertragbarkeit der dargestellten Ansätze zur Beschreibung von Alterungseffekten ist auf die prozessrelevanten Zeit- und Temperaturbereiche zu prüfen sowie eine Erweiterung der Modellansätze zur Integration von Konditionierungseinflüssen zu implementieren. Somit ist eine vollständige Abbildung von Einflüssen auf das Materialverhalten möglich, die in direkter Korrelation zum Verarbeitungsprozess und den Schwankungen der Qualitätsparameter stehen.

Die aktuellen Möglichkeiten der Prozesssimulation bieten eine sehr detaillierte Option, Auswirkungen durch Materialvariationen auf den Spritzgießprozess zu analysieren. Allerdings kann die Simulation nur entsprechend der hinterlegten Materialmodelle und Messdaten Auswirkungen aufzeigen. Für eine verlässliche Prozesssimulation ist es daher notwendig, ein umfassendes Materialmodell zu entwickeln und auch sehr geringe Variationen in den Fließeigenschaften messtechnisch zu erfassen. Hier müssen sowohl die bereits vorgestellten chemischen Einflüsse durch Zeit- und Temperaturbelastung als auch mögliche physikalische Strukturänderungen integriert werden. Eine Prozesssimulation, die sowohl Einflüsse aus der Materialkonditionierung, Prozessbedingungen als auch die Bandbreite der tolerierten Chargenschwankungen abbilden kann, ermöglicht zum einen die Simulation zu erwartender Prozessschwankungen, zum anderen die Entwicklung möglicher Kompensationsstrategien zur Prozessadaption und Qualitätsregelung.



### 3 Prozessführung und Qualitätsregelung beim Spritzgießen

Zunehmende Anforderungen an die Qualität und Komplexität der Bauteile einer Spritzgießproduktion haben zu einer hochentwickelten und breit aufgestellten Maschinentechnik innerhalb der letzten Jahre geführt. Das Spektrum der Qualitätsanforderungen reicht von Anforderungen an die Maßhaltigkeit und das Bauteilgewicht bis hin zu optischen, akustischen, haptischen und mechanischen Eigenschaften. Dabei bleibt der grundsätzliche Verfahrensablauf weitestgehend erhalten. Die Antriebstechnik und spezielle integrierte Prozessschritte können sich allerdings deutlich unterscheiden. Für eine genaue Diskussion der unterschiedlichen Antriebskonzepte und Verfahrensvarianten soll auf die angegebene Literatur, wie z.B. [Bi12, Jo04, JM04, Mi06, MM08, OTG08, SK04, TS+10, WJK04] verwiesen werden. Im Weiteren wird der allgemeine Verfahrensablauf mit den entscheidenden Prozessparametern und Störgrößen dargestellt. Anschließend werden aktuelle Lösungen und Ansätze zur Qualitäts- und Prozessregelung diskutiert.

#### 3.1 Konventionelle Prozessführung

Der Spritzgießprozess umfasst mehrere Teilprozesse, die zyklisch nacheinander ablaufen. Eine Übersicht über den generellen Prozessablauf ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Die Anlagen sind dabei fähig, die Achsbewegungen mit höchster Reproduzierbarkeit automatisch auszuführen und Temperaturvorgaben in geringen Streubreiten konstant zu halten. Eine detaillierte Darstellung zum aktuellen Stand der Maschinentechnik kann in der folgenden Literatur [Go13, Ha12, MH+11a, MM08, St13, TS+10] eingesehen werden.

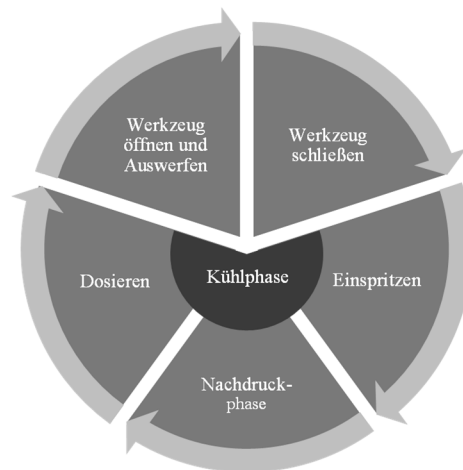


Abbildung 3-1 Prozessablauf beim Spritzgießen nach [Mi06]

Die Bereiche der Werkzeugbewegung und des Formteilauswurfs sind aus Sicht der Prozessregelung auf Grund des hohen Maschinenstandards nicht als relevant zu bezeichnen. Aktuelle Maschinenkonzepte mit Kniehebelschließeinheiten bei elektrischen Antrieben oder entsprechenden hydraulischen Fahrzylinder-Konzepten erreichen eine hohe Genauigkeit bei der Reproduktion der eingestellten Parameter und haben bei einer robusten Wahl der Einstellgrößen keinen Einfluss auf die Bauteilqualität. [TS+10]

Mit Bezug zu den Zielgrößen der Produktion sind die Phasen der Plastifizierung und Formteilmildung entscheidend. Innerhalb der Plastifizierungsphase wird eine definierte Schmelzmenge für den Formbildungsprozess aufbereitet. Die Schmelzequalität ergibt sich hierbei aus der Maschinenkonfiguration, den Prozessparametern sowie der Rohstoffkonditionierung. Die Zielsetzung ist dabei, eine möglichst stofflich und thermisch homogene Schmelze für die Formteilmildung zur Verfügung zu stellen. Die Phase der Formteilmildung wird unterteilt in den Füllvorgang und den Verdichtungs Vorgang [SK04]. Der Formfüllvorgang beinhaltet die Füllung der Werkzeugkavität durch das plastifizierte Material im Schneckenorraum. Die axiale Vorwärtsbewegung der Schnecke und damit Verdrängung des Massepolsters aus der Plastifiziereinheit in die Kavität, wird maschinenseitig geschwindigkeitsgeregelt durchgeführt [Jo04, JM04, SK04]. Dieser Vorgang hat einen sehr hohen Einfluss auf die Oberflächenqualität des späteren Bauteils [JM04]. Ist die volumetrische Füllung der Kavität

erreicht, wird in den Verdichtungsvorgang oder die Nachdruckphase umgeschaltet. Die Definition des Umschaltkriteriums ist unter anderem über die Schneckenposition, Zeit- oder Druckvorgaben möglich. Ein Vergleich verschiedener Umschaltkriterien und entsprechender Prozesseinflüsse sind in [DET03, Go09, KV+10, KH+13] dargestellt. In der Nachdruckphase wird die volumetrische Schwindung des Kunststoffes in der Kavität ausgeglichen bis eine Versiegelung der Kavität im Anguss eingetreten ist. Dieser Vorgang ist maschinenseitig durch den anliegenden Hydraulikdruck bei hydraulischen Antriebskonzepten oder über die auf die Schnecke wirkende Kraft bei elektrischen Antriebskonzepten geregelt [MSL08].

Trotz hoher Präzision der Achsenbewegungen kommt es in der Formteilbildung zu Schwankungen im verdrängten Massepolster. Ein kritisches aber notwendiges Bauteil für die Formteilbildung ist in diesem Zusammenhang die *Rückströmsperre* (RSP). Am weitesten verbreitet ist die Variante der Ringrückströmsperre, die durch einen axial beweglichen Sperring auf der Schnecke zu Beginn der Einspritzbewegung gegen die Zylinderinnenwand über eine Kegelfläche dichtet. Diese passive Dichtung ist vom Strömungswiderstand des plastifizierten Kunststoffes sowie der Lage im System Schnecke-Zylinder abhängig und unterliegt einem hohen Verschleiß. Daher kann es bei Variationen in der Viskosität, der Schneckenposition und Lage des Ringes zu Beginn der Bewegung zu Schwankungen im Schließverhalten kommen. Dies beeinflusst das innerhalb des geschwindigkeitsgeregelten Formfüllvorganges verdrängte Schmelzevolumen und damit die Prozess- und Produktqualität. Aktuelle Entwicklungen sind aktive Verschlussysteme auf elektrisch angetriebenen Anlagen, die durch eine Drehung der Schnecke entgegen der Plastifizierrichtung vor dem Einspritzvorgang schließen [MEG13, Th12]. Diese Systeme verbessern die Prozesskonstanz, sind aber aktuell noch nicht auf allen Anlagengrößen und Antriebssystemen verfügbar. Hinzu kommt, dass insbesondere bei Füllstoffen ein sehr hoher Verschleiß bei diesen aktiven Systemen auftreten kann. Die Auswirkungen des Schließverhaltens der Rückströmsperre sowie Kompensationsstrategien durch die Prozessführung werden in Kapitel 6 diskutiert.

### 3.1.1 Wahl eines robusten Betriebspunktes

Um eine stabile Prozessführung in der Produktion zu gewährleisten, werden bereits im Vorfeld der Produktion Maßnahmen für einen robusten Betriebspunkt getroffen. Die wichtigste Anforderung an den Prozess ist dabei die genaue Einhaltung der geforderten Produktspezifikationen sowie Zielgrößen im Prozess innerhalb einer minimierten Streubreite. Für einen robusten Betriebspunkt gilt, dass an diesem Punkt innerhalb des Betriebsfensters die Streuungen der Zielgrößen minimal sind. [Bo94, ME01, Wo96]

Durch die Einstellung eines robusten Betriebspunktes soll der Produktionsprozess durch die Reproduzierung der gewählten Einstellparameter möglichst unempfindlich gegen Störeinflüsse sein. Dabei ist eine robuste Maschineneinstellung „eine stets prozessspezifische Kombination der Maschinenparameter“ [Bo94] und die Reproduzierbarkeit stets von der Maschinenfähigkeit, Prozessfähigkeit und Konstanz der Eingangsgrößen abhängig. Auch die Wahl der Betriebsart, wie zum Beispiel die Umschaltmethodik, hat einen entscheidenden Einfluss auf die Robustheit eines Prozesses, abhängig von den auftretenden Störungen [AB02]. Zur Einstellung eines Betriebspunktes oder der Optimierung von bestehenden Einstellungen gibt es unterschiedliche Ansätze, die bis hin zu einer umfangreichen Versuchsplanung nach statistischen Methoden reichen [MM09]. Für eine umfassende Analyse kann ein sehr hoher Zeitaufwand anfallen, hinzu muss eine genaue Kenntnis aller potentiellen Störeinflüsse vorhanden sein. Mit den traditionellen Methoden der Versuchsplanung und einer Auswertung des S/G-Verhältnisses in dem untersuchten Prozessraum kann allerdings mit überschaubarem Versuchsaufwand eine gute Robustheit gegen Schwankungen erreicht werden [Bo94].

Nach aktuellem Stand der Technik ist die statistische Versuchsplanung in der Produktion ein etabliertes Mittel zur Störgrößenminimierung und wird durch die zunehmende Verfügbarkeit von Prozessdaten mit hoher Detailtiefe in der Anlagensteuerung oder in übergeordneten Systemen unterstützt [Gu04, Ho11, JC+11]. Allerdings werden innerhalb der Versuchspläne die eigentlichen Störgrößen der variierenden Materialeigenschaften und verschleißbedingte Einflüsse nicht berücksichtigt. Eine Robustheit gegen diese Einflüsse der Maschinen- und Prozessfähigkeit, ist daher nur bedingt gegeben. Für eine detaillierte Diskussion der Methodik zur Versuchsplanung und Auswertung soll auf folgende Literatur [K109, ML07, Ra08, SvH10, Wo96] verwiesen werden.

### 3.2 Qualitätsanforderungen beim Spritzgießen

Der Begriff Qualitätsanforderungen beschreibt die „Gesamtheit der betrachteten Einzelanforderungen an die Beschaffenheit einer Einheit“ [Li11] unter Berücksichtigung der Konkretisierung jeder Einzelanforderung. In der gültigen Norm zum Qualitätsmanagement beschreibt Qualität die realisierte Beschaffenheit eines Bauteils oder Produktes bezüglich der gestellten Qualitätsanforderungen [DI05, GK08, Li11]. Nur anhand von objektiv messbaren Eigenschaften und Merkmale kann auf Grundlage der Qualitätsanforderungen und Merkmale eine Vergleichbarkeit geschaffen werden [Wo96]. Dabei muss die Messung direkt die Merkmale und deren Ausprägung abbilden.

Nach [Ha04] definieren sich die Qualitätsmerkmale von Spritzgießteilen anhand von Gewicht, Maßhaltigkeit, Oberflächenstruktur, Massehomogenität und Morphologie.

Tabelle 3-1 Qualitätsmerkmale von Spritzgießteilen nach [Ha04]

Qualitätsmerkmal	Beschreibung
Gewicht	Das Gewicht des Formteils ist ein wirtschaftl. Prüfparameter für die Reproduzierbarkeit seiner Herstellung.
Maßhaltigkeit	Die Geometrie des Formteils kann als weiterer Prüfparameter herangezogen werden. Die Abmaße des Spritzgießteils werden erfasst und mit Referenzgrößen verglichen. Die wesentlichen Einflüsse auf dieses Qualitätsmerkmal sind, neben der Wärmedehnung des Werkzeuges, der mechanischen Belastung, der Schwindung des Werkstoffes auch die Eigentemperatur und der Wassergehalt des Werkstoffes.
Oberflächenstruktur	Das äußere Erscheinungsbild des Spritzgießteils ist im Wesentlichen von Form und Farbe bestimmt. Daneben spielt auch die Oberflächenqualität eine zentrale Rolle. Glanzgrad und Oberflächengüte sind die wichtigsten Kriterien.
Massehomogenität	Die Homogenität der Schmelze wird unterteilt in die thermische und die stoffliche Homogenität. Die thermische Homogenität ist auf ein gleichmäßiges Temperaturprofil der Schmelze bezogen. Die stoffliche Homogenität bezieht sich auf eine gleichmäßige Molekülorientierung sowie die gleichmäßige Verteilung von gegebenenfalls Additiven. Des Weiteren kann in die Reinheit eines Stoffes unterschieden werden oder der gleichmäßigen Verteilung von Inhaltsstoffen bei Gemischen.
Morphologie	Eigenschaften physikalischer Art werden durch die Ausrichtung der Makromoleküle bestimmt. Durch die Abkühlbedingungen werden insbesondere die obersten Schichten und deren morphologisches Gefüge beeinflusst. Damit werden auch Oberflächenanforderungen sowie mechanische Eigenschaften bedingt.

Zur Bewertung der Prozess- und Produktqualität müssen die betreffenden Störeinflüsse bekannt sein und messbaren Größen zugeordnet werden. Über eine direkte Zuordnung der Störgrößen, Merkmalsausprägung und der Abläufe im Produktionsprozess kann eine Überwachung, Regelung und damit Steigerung der Qualität erfolgen.

#### 3.2.1 Einflüsse auf Prozess- und Produktqualität

Wird eine Spritzgießproduktionszelle als System aus Spritzgießmaschine, Werkzeug und Temperierung beschrieben, dann können die Systemeingangs- und Ausgangsgrößen durch Stoff- und Energieströme abgebildet werden. Die Haupteingangsgrößen sind über die elektrische Energieversorgung und den zu verarbeitende Kunststoffmassenstrom definiert. Hinzu kommt eine entsprechende Temperierung durch Kühlwasser oder Öltemperierung. Ausgangsgrößen sind neben den Bauteilen, als verarbeitetes Material, Energieströme durch Abwärme an die Umgebung und innerhalb des Temperierkreislauftes. Durch eine klare Beschreibung der Eingangsgrößen kann zudem ein Systemgrenzen übergreifender Zusammenhang zu vorgeschalteten Prozessen gebildet werden.[Sc09, WS07]

In Abbildung 3-2 ist eine Übersicht der Ein- und Ausgangsgrößen sowie der Einflüsse auf diese Bereiche dargestellt. Der Einfluss der Spritzgießmaschine auf die Formteilqualität hängt mit der Höhe der erzeugten Prozessparameterstreuungen im Betrieb, beschrieben durch die Maschinenfähigkeit, zusammen. Die Prozesseinflüsse durch die Maschinenfähigkeit lassen sich auf die Regelgenauigkeit, die Reproduziergenauigkeit der Parametervorgaben und auf den Verschleiß über der Betriebsdauer zurückführen. Diese Störgrößen sind vielfach nicht vermeidbar [Sc09, Wo96].

Dabei sind innerhalb des Begriffes Maschinenfähigkeit Einflüsse durch Mensch, Methode, Material und Mitwelt ausgeschlossen [ML07]. Der Verarbeitungsprozess wird demnach maschinenseitig hauptsächlich über die Einstellwerte der Prozessparameter und der Fähigkeit der Maschine diese zu reproduzieren beeinflusst. Aktuell sind Anlagen mit einer sehr hohen Maschinenfähigkeit verfügbar, daher können Einflüsse auf die Qualitätsmerkmale durch die Anlage als sehr gering eingestuft werden [Bi08, Ku98, TS+10].

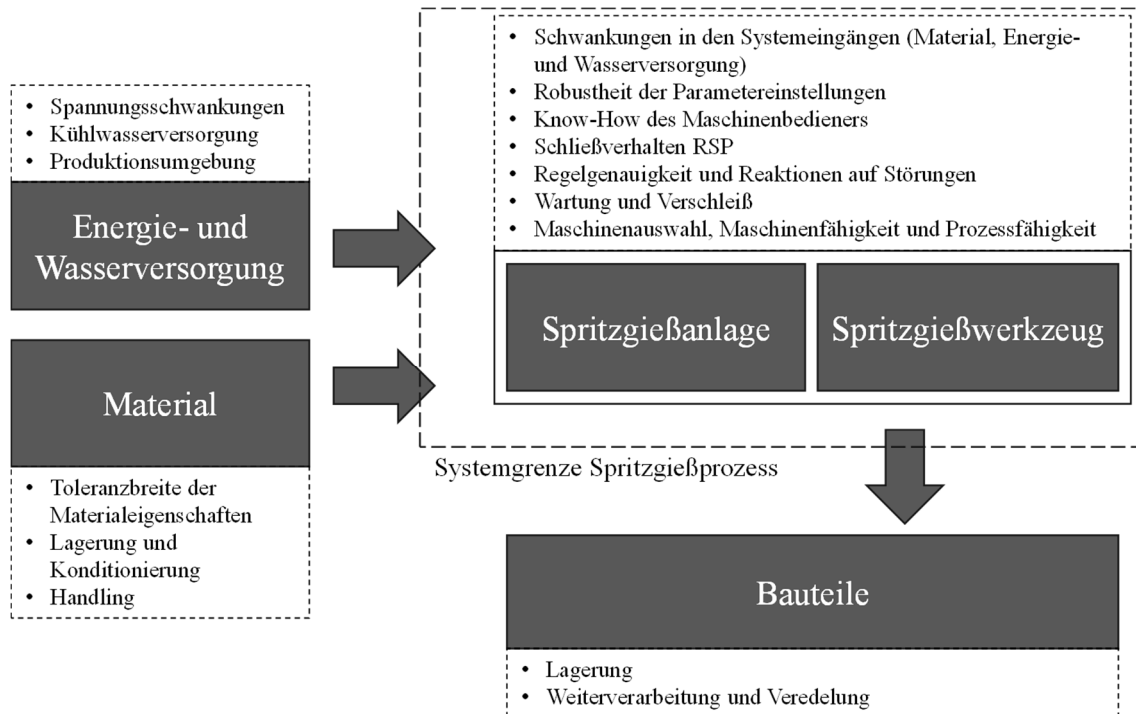


Abbildung 3-2 Einflüsse auf die Prozess- und Produktqualität im System Spritzgießproduktion

Bei der erweiterten Betrachtung der Prozessfähigkeit eines Produktionssystems werden die Einflüsse durch die Parameterwahl des Anlagenbedieners, Schwankungen in den Eingangsströmen und Umgebungseinflüsse mit einbezogen. Durch die Wahl eines robusten Betriebspunktes (vgl. Kapitel 3.1.1) beim Einrichten des Prozesses und entsprechend sorgfältige Produktionsplanung, können die Störeinflüsse durch die Bedienung, die Umgebung und Schwankungen in der Energieversorgung minimiert werden. Die Bereitstellung von Kühlwasser und die Temperierung von Werkzeug und Anlage ist ein wichtiger qualitätsbestimmender Faktor, der aber beherrscht werden kann [Go13].

Innerhalb der Systemeingänge ist insbesondere der Materialzustand eine entscheidende Eingangsgröße und kritisch zu betrachten. Der Materialzustand wird durch zwei wesentliche Faktoren beeinflusst. Zum einen durch die mit dem Hersteller abgestimmte Toleranzbreite der Eigenschaften und zum anderen durch die Lagerung und Konditionierung des Materials vor dem Verarbeitungsprozess. Hinzu kommt die thermisch-mechanische Belastung durch das eingestellte Temperaturprofil und die Prozessparameter sowie die Verweilzeit des Materials innerhalb des Verarbeitungsprozesses. Die initialen Rohstoffeigenschaften von Polymeren werden durch die Herstellungsverfahren und Syntheschwankungen beeinflusst. Entsprechend der Ausgangsmaterialien und Prozesseinstellungen bei der Polymerisation können die Materialeigenschaften in den vereinbarten Toleranzen variieren. Der Haupteinfluss auf die Prozess- und Produktqualität ist auf Viskositätsschwankungen zurückzuführen, hinzu kommt bei teilkristallinen Kunststoffen das Kristallisationsverhalten. Außerdem muss zunehmend die Verarbeitung von Regranulat und recyceltem Material beachtet werden. In diesem Fall können der Alterungsgrad und die Zusammensetzung variieren. Damit verschieben sich durch die Veränderung des initialen Materialverhaltens die optimalen Prozesseinstellungen. [Ca05, Uj99, Wo96, WSF08]

Bei der Verarbeitung von technischen, hygroskopischen Kunststoffen ist im Weiteren der Konditionierungsprozess als Einfluss auf das Material zu beachten [WS03]. Restfeuchteschwankungen haben Einfluss auf die Viskosität der Schmelze und wirken sich auf das Bauteilgewicht, damit korrelierenden Qualitätsmerkmalen

und die Oberflächen der Spritzgießteile aus. Dieser Einfluss ist bereits vielfach in der Literatur diskutiert worden und Gegenstand aktueller Untersuchungen. Neben der Konditionierung und dem Restfeuchtegehalt spielt dabei auch die thermische Belastung innerhalb des Trocknungsprozesses mit entsprechenden Alterungsreaktionen eine Rolle. [Bo11, MC+12, Mu00, PGS12, Ra13, SYS12, Sc09]

Die Zusammenhänge zwischen den Systemeingängen, Qualitätsmerkmalen, Prozessgrößen und deren Wechselwirkungen untereinander sind nicht allgemein bekannt oder übertragbar. Daher wird versucht über die Einhaltung von Prozessparametertoleranzen die Qualitätsmerkmale ebenfalls in einem Toleranzbereich zu halten [Wo96]. Bei der konventionellen Prozessführung werden die qualitätsbestimmenden Vorgänge in der Einspritz- und Nachdruckphase durch die Störgrößen negativ beeinflusst. Beispielweise beeinträchtigt das viskositäts- und positionsabhängige Schließen der Rückströmsperre bei konventioneller Prozessführung auf Basis der Schneckenanschubgeschwindigkeit und -position den Füllstand der Kavität am Umschaltzeitpunkt [MEG13, MHG04]. Die reproduzierten Prozessgrößen korrelieren nicht mehr mit den geforderten Qualitätskriterien. Die vorgegebenen Einstellparameter zur Prozessführung werden reproduziert, aber nicht an die aktuelle Prozesssituation angepasst. Dadurch kommt es bei geringen Variationen innerhalb der resultierenden Prozessparameter zu wesentlichen, die Bauteilqualität betreffenden, Prozessänderungen. Um diese Einflüsse kompensieren zu können, sind Qualitätsregelungen zur Adaption der Prozesseinstellungen notwendig.

### 3.3 Stand der Qualitätsregelung und Prozesskontrolle beim Spritzgießen

Die Regelung der Achsbewegung innerhalb des Spritzgießzyklus wird neben einfachen Regelkonzepten auch durch den Einsatz angepasster, komplexerer Regelungssysteme umgesetzt. Die hohe Rechenleistung der verbauten Steuerungen hat zur Implementierung von komplexen Regelalgorithmen mit sehr geringer Regelabweichung beigetragen [AD07]. Vollgeregelter Spritzgießmaschinen zeigen eine sehr gute Beherrschbarkeit der zu regelnden Prozessschritte sowie eine hohe Reproduziergenauigkeit. Dies gilt neben den Bewegungsachsen auch für die Temperaturregelung der Zylinderzonen, die eine ausreichende Genauigkeit in der Einstellung des Temperaturprofils erlaubt. [Mu00, Sc09, Uj99]

Trotz der Wahl eines robusten Betriebspunktes und aktueller Maschinenfähigkeit bleibt die Problematik bestehen, dass eine Spritzgießanlage lediglich Parametereinstellungen innerhalb einer gewissen Streuungsbandbreite reproduziert. Treten gravierende Prozessstörungen auf, reicht dieses Verhalten nicht aus, um die Qualität zu sichern. Ein verändertes Betriebsverhalten durch Schwankungen in der Öltemperatur, Verschleiß und variierende Verarbeitungseigenschaften der Materialien führen bei den durch die Reproduzierung von Einstellparametern geregelten Spritzgießprozessen zu hohen Abweichungen der Formteilqualität. Eine adaptive Maschinenregelung ist notwendig, um auf die Veränderungen in den Prozessbedingungen und Eingangsgrößen zu reagieren. Dies gilt insbesondere für Prozesse mit sehr hohen Qualitätsanforderungen für die Bauteileigenschaften und detaillierten Anforderungen für Folgeprozesse zur Veredelung und Weiterverarbeitung. Hier reichen bereits minimale Schwankungen in der Materialkonditionierung, um Qualitätsmängel zu erzeugen. Daher werden im Folgenden Ansätze vorgestellt, um die Zielgröße Qualität über eine Regelung des Prozesses und adaptive Maßnahmen konstant zu halten. Durch die hohe verfügbare Rechenleistung der Anlagensteuerungen finden komplexe adaptive Regelkonzepte immer häufiger Anwendung und sind direkt in den Steuerungen der Maschinen integrierbar. Entscheidend ist hierbei die Korrelation zwischen der Bauteilqualität, den Prozessgrößen und Maschinenparametern. Eine kontinuierliche Erfassung der Bauteilqualität als direkt messbares Kriterium ist in der Praxis nicht oder nur sehr aufwändig umzusetzen. Daher wird die Qualität innerhalb der Konzepte entweder über ein Modell referenziert oder über Hilfsgrößen erfasst. Im Bereich der Gewichtskontrolle und der Kontrolle optischer Merkmale sind im Bereich der Maschinenentwicklung erste Systeme für die direkte, automatische Erfassung der Qualitätsparameter nach dem Prozess verfügbar [BF+14a, BF+14c, Sc14].

#### 3.3.1 Modellbildung zur prognosebasierten Qualitätsregelung

Um die direkte Messung von Qualitätsmerkmalen an jedem Bauteil zu vermeiden, gibt es Ansätze zur Prognose der Bauteilqualität. Kalibrierte Modelle bilden die Korrelation zwischen den Zielgrößen und erfassten Prozessgrößen ab. Die prognostizierten Werte können für eine Nachführung der Maschineneinstellparameter genutzt werden, um diese gemäß eines konstanten Qualitätskriteriums zu adaptieren. Die Methodik der Modellbildung wird dabei in zwei Bereiche unterschieden, die physikalische und die empirische oder statistische Modellbildung. Aktuelle Anwendungen werden im Anschluss an die allgemeine Darstellung diskutiert. [Hä95, Mu00, Wa00]

##### 3.3.1.1 Physikalische Modellbildung

Die physikalische Modellbildung beschreibt die physikalischen Abhängigkeiten des Prozess in einem mathematischen Modell. Für physikalische Modelle ist eine hohe Detaillierung notwendig. Dabei werden für jeden Teilprozess die entsprechenden Eigenschaftsänderungen erfasst und physikalisch abgebildet. Für die Lösung der zugrundeliegenden Gleichungssysteme ist eine analytische Vorgehensweise meist nicht mehr ausreichend und es muss auf numerische Berechnungen zurückgegriffen werden. Eine Darstellung der physikalischen Phänomene innerhalb des Spritzgießzyklus ist aktuell nicht mit ausreichender Genauigkeit verfügbar. Es existieren Beschreibungen von Teilprozessen, die aber durch Vereinfachungen sowie Rand-, Anfangsbedingungen und Beschreibung der Materialeigenschaften in der Prognosegüte beeinflusst werden. [Ha04, Ma85, Wa00]

### 3.3.1.2 Empirische Modellbildung

Alternative Methoden der Modellbildung ergeben sich durch die empirische oder statistische Modellbildung. Zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen Qualitätsmerkmalen, Maschineneinstellparametern und resultierenden Prozesskennzahlen werden keine physikalischen Abhängigkeiten herangezogen, sondern statistische Modell durch empirische Ansätze gebildet [Wa00]. Dabei muss eine Auswertung und Bewertung der an der Maschine aufgenommenen Daten hinsichtlich repräsentativer Abhängigkeiten erfolgen. Die Modellbildung erfolgt durch mathematisch-statistische Verfahren oder durch Unterstützung von *Computational Intelligence* (CI). Hierzu gehören neuronale Netzwerke, Fuzzy-Logic und genetische Algorithmen. [Hä95, Mu00]

Entscheidend ist die detaillierte und signifikante Abbildung der Qualitätsmerkmale und der Einflüsse auf diese in den Detektionsparametern aus dem Produktionsprozess. Um eine vollständige Regelung anhand des Prognosemodells zu etablieren, ist außerdem eine Korrelation zu Maschineneinstellparametern zur Kompensation notwendig [Mu14]. Abbildung 3-3 stellt die Funktionsweise eines auf Basis eines empirischen Prognosemodells geregelten Prozesses dar.

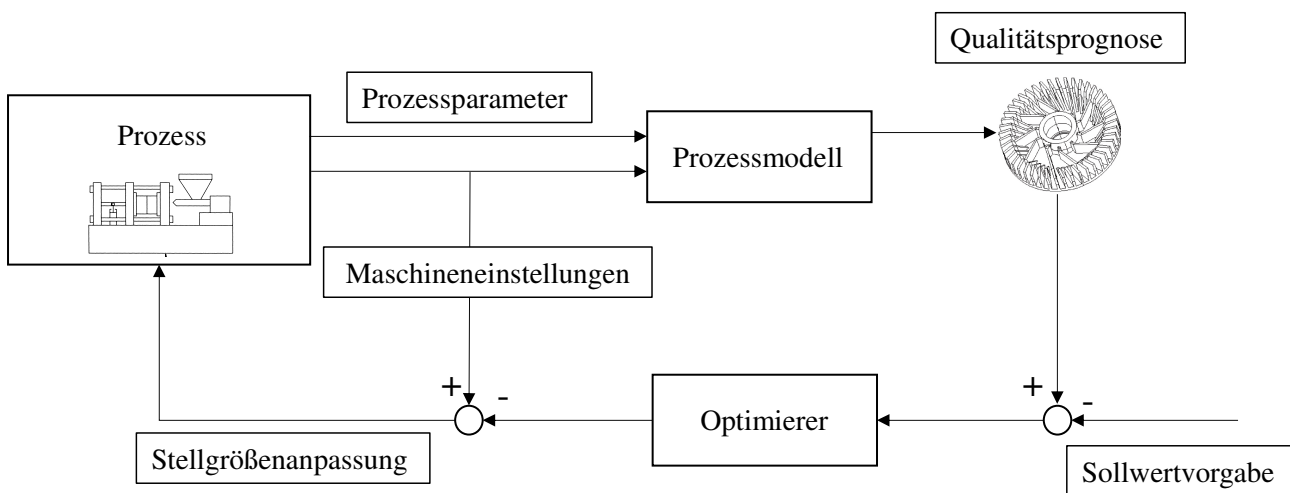


Abbildung 3-3 Schematische Darstellung eines empirischen Modells zur Prozessregelung nach [Mu00, Sc09]

Trotz der über weite Strecken richtigen Qualitätsprognose ist als Nachteil zu erwähnen, dass die physikalischen Zusammenhänge unbekannt bleiben. Nur bekannte Einflüsse auf die Bauteilqualität können dargestellt und kompensiert werden. Andere Abhängigkeiten, wie z.B. Verschleiß und Sensordrifts, werden nicht berücksichtigt. Das Modell muss jeweils prozessspezifisch angepasst werden [Hä95, Wa00].

### 3.3.2 Ansätze zur Prozessführung und Prozessregelung anhand von Prozessparametern

Besonders hohe Prozessrelevanz für der Verarbeitung von Polymeren beim Spritzgießen haben die Massetemperatur der Schmelze sowie das Druckprofil während der Formgebung. Über das dynamische  $pVT$ -Verhalten kann diesen Prozessparametern ein direkter Zusammenhang zur Bauteilqualität zugeordnet werden. Um eine konstante Bauteilqualität zu gewährleisten, verfolgen einige Regelkonzepte die Vorgehensweise, über eine Anpassung entsprechender Maschineneinstellparameter die Konstanz resultierender Prozesskennzahlen zu garantieren. Dies setzt voraus, dass bei konstanten Prozessparametern auch die Qualitätskriterien konstant gehalten werden können.

#### 3.3.2.1 Wahl des Umschaltpunktes

Der Umschaltpunkt als Prozessparameter hat eine hohe Bedeutung für die Qualität bei der aktuellen Prozessführung beim Spritzgießen. Durch ein zu frühes Umschalten von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase auf die druckgeregelte Nachdruckphase kommt es zu einem kurzzeitigen Stillstand der Schmelzefront und Oberflächenmarkierungen am Bauteil. Ein zu spät gewählter Umschaltpunkt führt zu hohen resultierenden

Druckspritzen, die durch ein Überspritzen des Werkzeugs einen Grat am Bauteil oder eine Beschädigung des Werkzeugs nach sich ziehen. [DET03, KV+10, Sc09]

Bei einer positionsabhängigen Umschaltmethode wird ein definiertes Schmelzevolumen in die Kavität während der Einspritzphase verdrängt und an einer vorgegebenen Position der Schnecke auf die Nachdruckbewegung umgeschaltet. Diese Methode ist weitestgehend unabhängig von Viskositätsschwankungen im Material, wird allerdings sehr stark durch Leckageverluste und dem Schließverhalten der Rückströmsperre beeinflusst [PGS12]. Bei druckabhängigen Umschaltmethoden wird bei einer vorgegebenen Druckgrenze auf die druckgeregelte Nachdruckphase umgeschaltet. Mögliche Drucksignale sind der Werkzeuginnendruck, der Druck im Schneckenorraum oder mit Hilfe eines äquivalenten Massedrucks, umgerechnet aus der am Schneckenschaft anliegenden Kraft [JM04]. Verändert sich der Druckanstieg auf Grund von Unterschieden in der verdrängten Schmelzemenge, so wird entsprechend zu einem anderen Zeitpunkt die Druckgrenze erreicht und der Umschaltvorgang ausgelöst. Allerdings können starke Viskositätsschwankungen zu Ungenauigkeiten führen, da die Viskosität des Materials entscheidenden Einfluss auf den resultierenden Druck in der Einspritzbewegung hat und somit der Füllgrad der Kavität zum Zeitpunkt des Umschaltvorgangs beeinflusst wird [PGS12]. In der Produktion treten sowohl Mengenschwankungen als auch Viskositätsschwankungen auf. Mit Bezug zum Schließverhalten der Rückströmsperre bedingen die Viskositätsschwankungen zusätzlich die Mengenschwankungen. Daher kann bisher keine optimale Umschaltmethode festgelegt werden.

Neben den an der Spritzgießmaschine verfügbaren Druck-, Zeit- und Wegsignalen können auch weitere Prozessparameter durch zusätzliche Sensorik zur Definition des Umschaltkriteriums herangezogen werden. Ein Beispiel ist die werkzeuginnendruckabhängige Wahl des Umschaltpunktes [Gr05]. Die Druckhöhe kann durch Simulationsrechnungen oder in Vorversuchen ermittelt werden. Zum Vorteil dieser Methode gereicht die Möglichkeit, Schwankungen im Dosierweg zu kompensieren und dadurch eine höhere Prozesskonstanz zu gewährleisten. Nachteilig ist zu erwähnen, dass der eingesetzte Drucksensor im Werkzeug in Bezug auf die Sensorik anderer Methoden kostenaufwendig ist und Markierungen auf dem Formteil hinterlässt. [Gr05, Ku98]

Erweitert werden kann diese Methodik durch optische Sensoren oder Temperatursensoren in der Kavität. Die füllgradinduzierte Umschaltung erfasst mit Hilfe eines optischen Sensors, der als Lichtschranke fungiert, den Füllgrad der Kavität und schaltet dann auf Nachdruck um. Dabei wird der Sensor am Fließwegende im Werkzeug verbaut. Dieser detektiert zu welchem Zeitpunkt die Schmelze vorbeiströmt und ist somit unabhängig vom Schließverhalten der Rückströmsperre und Viskositätsschwankungen [Ku98]. Eine in [Ba08] vorgestellte Umschaltmethode detektiert mit Hilfe von Temperatursensoren in Werkzeugwandnähe kurz vor Fließwegende die Position der Schmelzefront und schaltet automatisch auf Nachdruck um. Der Temperaturanstieg, der innerhalb weniger Millisekunden nach Eintreffen der Schmelze erfolgt, signalisiert der Maschine den Umschaltpunkt. Innerhalb dieses hochdynamischen Prozesses ist die Sensorauflösung und Signalübertragungszeit ebenfalls ein wichtiges Kriterium für die Genauigkeit der Prozessführung. [BZ10, SB08]

Weitere von diesen Methoden abgeleitete Umschaltstrategien und deren Einfluss auf die Prozessführung und Produktqualität sind in der Literatur [DET03, Go09, KV+10, KH+13] dargestellt. Eine breite Umsetzung der vorgestellten Umschaltkriterien hat auf Grund der zusätzlichen Sensorik bisher nicht stattgefunden [CW09]. Aktuelle Methoden, bei denen der Umschaltpunkt aktiv entlang einer Regelstrategie verschoben und in eine Prozessregelung integriert ist, sollen im Weiteren die adaptive Prozessregelung betreffend diskutiert werden (Kapitel 3.3.4).

### 3.3.2.2 Werkzeuginnendruckregelung

Eine Prozessgröße, die im konventionellen Spritzgießverfahren nicht geregelt wird, ist der Werkzeuginnendruck. Eine Überwachung und Einstellung der Prozessparameter vor der Produktion unter Berücksichtigung des Werkzeuginnendrucks wird zunehmend umgesetzt. Die Nutzung von Drucksignalen aus dem Werkzeug ist für die Qualitätsregelung nicht nur als Umschaltkriterium sehr interessant und daher Gegenstand einer Vielzahl von Forschungsaktivitäten für unterschiedliche Regelungskonzepte. Im Folgenden wird eine kurze Übersicht zu Regelansätzen mit Bezug zum resultierenden Werkzeuginnendruck gegeben. Die Korrelation des Werkzeuginnendrucks zu Qualitätskriterien, wie dem Bauteilgewicht und Maßhaltigkeit, ist in der Literatur



eindeutig belegt und wird auch für aktuelle Entwicklungen herangezogen. [BKS13, He76, MG05, MHR11, Rö79, Sc11, St73]

Anhand des Druckumschaltpunktes als Führungsgröße wird in einem in [He77] erstmals vorgestellten Ansatz, ein konstantes Maximum des Werkzeuginnendruckes erzielt. Die Führungsgröße wird von Zyklus zu Zyklus angepasst, um ein möglichst konstantes Druckmaximum im Werkzeug zu erzielen. Neben dieser Lösung für einen Einzelwert, sind auch Regelungen für die Höhe des Werkzeuginnendruckes im Verlauf des Spritzgießprozesses bekannt. In [SH+91] wird ein Ansatz vorgestellt, in dem während der Nachdruckphase eine Werkzeuginnendruckregelung durch einen geschlossenen Regelkreis stattfindet. Die hinterlegten Modelle basieren auf experimentell ermittelten Daten, die Wirksamkeit der Regelstrategie konnte eindeutig dargestellt werden. Ein mit einem prädikativen Regler umgesetztes System wird in [CHD11] vorgestellt. Für eine detaillierte Beschreibung der Verfahren soll auf folgende Literatur [BK12, Ca05, Gr05, He77, He76, Mu00, SN04, Va96] verwiesen werden.

Neben Regelungen mit dem Ziel einen Prozessparameter konstant zu halten, sind hier auch Konzepte bekannt, die Referenzprofile entsprechend dem physikalischen Werkstoffverhalten vorgeben. Diese meist mit adaptiven oder prädiktiven Regler umgesetzten Ansätze werden im Detail in Kapitel 3.3.4 diskutiert.

### 3.3.2.3 Massetemperaturregelung

Ein Beispiel für Regelungsansätze mit direktem Bezug zu Prozessparametern und dem Materialzustand ist die Massetemperaturregelung, bei der über eine Anpassung der Schneckendrehzahl in der Plastifizierphase, Staudruckerhöhe und Zylindertemperatur die resultierende Massetemperatur geregelt wird. Effektive Maschineneinstellgrößen und Stellgrößen für diese Regelung sind der Staudruck sowie die Schneckendrehzahl, die auch als Profil über dem Dosierweg umgesetzt werden können. Durch die axial gleichbleibende Schmelzetemperatur kann für den Prozess eine gleichbleibende Schmelzequalität zu einer konstanten Bauteilqualität führen. [Ca05, La96]

Nachteilig bei diesen Verfahren ist die langsame Reaktionszeit auf Störungen und demzufolge die geringe Genauigkeit im Regelverhalten. Die notwendige Massetemperaturmessung im Schneckenorraum ist aktuell noch sehr störanfällig und für eine online Erfassung nicht ausgelegt. Für eine Voroptimierung sind diese Regelungen geeignet, für ein schnelles und sicheres Ausregeln von Störgrößen dagegen nicht. Störungen können nicht im gleichen Zyklus referenziert ausgeregelt werden. [Mu00, Sc09, Uj99]

### 3.3.3 Ansätze zur Prozessregelung anhand von Prozesskennzahlen

Der Begriff Prozesskennzahl beschreibt Werte, die aus mehreren Prozessparametern oder Prozessparameterverläufen gebildet werden. Vorteilhaft ist, dass durch die mathematische Modellbildung in einer Prozesskennzahl mehrere Abhängigkeiten abgebildet werden können. Da die Qualität der Bauteile nicht im Prozess erfasst wird, soll über den Verlauf der Prozesskennzahlen auf die resultierende Qualität der Bauteile geschlossen werden. Bei der Regelung von Prozesskennzahlen sollen einzelne Kennzahlen in einem konstanten Bereich geregelt werden, um auf diese Weise auch die darauf bezogenen Qualitätskriterien konstant zu halten [Mu00].

#### 3.3.3.1 Fließzahlregelung

Prozesskennzahlen mit hoher Relevanz sind die Einspritzarbeit und das Fließintegral. Dabei wird innerhalb der Formfüllphase der *Druck im Schneckenorraum*  $p$  über dem zurückgelegten Schneckenweg  $s$  integriert. Die *Einspritzarbeit*  $W_e$  ergibt sich durch Multiplikation des Druckintegrals mit der Fläche des *Einspritzkolbens*  $A_K$  zu Formel 3-1. [JM04, LGP83]

$$W_e = A_K \int_{s_0}^{s_1} p(s) ds$$

Formel 3-1 Einspritzarbeit als Integral des Massedrucks über dem Schneckenweg

Die hohe Relevanz dieser Prozesskennzahl ergibt sich aus der Korrelation der eingebrachten Einspritzarbeit zum resultierenden Bauteilgewicht [Kö90, Sc09]. Eine verbesserte Aussagekraft kann im Vergleich zur Einspritzarbeit mit der ähnlich gebildeten *Fließzahl*  $F_Z$  erzielt werden. In dieser Kennzahl wird nur ein Ausschnitt des Druckverlaufes während der Einspritzbewegung betrachtet, in dem ein stabiler Druckverlauf schwankungsarm vorliegt. Die in Einspritzarbeit und Fließzahl komprimierten Informationen sind sehr ähnlich. Der Vorteil der Fließzahl liegt allerdings in ihrer stärkeren Aussagefähigkeit, da eine Erstarrung der Schmelze unberücksichtigt gelassen wird und Beschleunigungsprozesse durch Wahl der Integrationsgrenzen ausgeschlossen werden können. Die Aussagefähigkeit der Fließzahl ist in mehrfachen Anwendungen belegt. [Kö90, LGP83, Sc09]

$$F_Z = f(\eta_{s,eff}, \dot{V}, \Delta s) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt$$

Formel 3-2 Formulierung der Fließzahl über einem festgelegten Bereich der Einspritzphase nach [JM04]

Die Fließzahl ermöglicht die Abbildung von Informationen zu den Materialeigenschaften innerhalb des Prozesses. Dabei ist insbesondere die Viskosität zu erwähnen, auf die Feuchtegehalt, Füllstoffgehalt, Alterung und Recyclatanteil starken Einfluss nehmen. Die Abhängigkeit des Druckverlaufes von der Materialviskosität bildet eine sehr gute Korrelation dieser Kennzahl zu Prozessschwankungen mit Qualitätseinflüssen. [HS+14, Mu00, Sc09, Sc14, Uj99]

Prozessregelungen auf Basis der Einspritzarbeit respektive Fließzahl werden in [JM04, LGP83, Wo86] vorgestellt. Adaptive Konzepte, in denen diese Prozesskennzahl ebenfalls Anwendung findet, werden in Kapitel 3.3.4 diskutiert.

### 3.3.3.2 Regelung der Massentemperaturerhöhung

Eine Prozesskennzahl mit direktem Bezug zu den Materialeigenschaften und den Verarbeitungsbedingungen ist die *integrale Temperaturerhöhung*  $TI$ . Diese Kennzahl fasst Informationen über die *Massentemperaturveränderung*  $\Delta T$  während der Einspritzphase nach Formel 3-3 zusammen. [BI96]

$$TI = \frac{\int_{t_A}^{t_E} \Delta T dt}{\Delta t}$$

Formel 3-3 Integral der Massentemperaturdifferenz in der Einspritzphase nach [BI96]

Effekte durch Kompression der Schmelze und dissipativ umgesetzte Energie durch Scherung der Schmelze im Strömungskanal während der Einspritzbewegung führen zu einer Massentemperaturerhöhung. Dies ist mit Bezug zu thermischer Schädigung des verarbeiteten Polymers kritisch zu betrachten, da ein materialspezifischer Grenzwert nicht überschritten werden darf. Vielmehr ist eine Konstanz in der Massetemperatur oder dem Massetemperaturprofil anzustreben, worauf diese Regelkonzepte ausgelegt sind. [Ca05, Mu00, Ta01]

Um die Temperaturverläufe in ausreichender Genauigkeit zu erfassen sind zusätzlich in den Strömungskanal integrierte, schnell reagierende Sensoren notwendig. Dabei sind die Messdaten und Einflüsse auf die Massetemperatur stark von der Lage der Sensoren abhängig. Durch die Überlagerung der verschiedenen Effekte auf die Massetemperatur, ist eine Regelung der Qualität mit dieser Kennzahl nur bedingt als kontinuierliche Prozessregelung geeignet. [Sc09, Ta01]

### 3.3.4 Adaptive Prozessregelung

Die bisher vorgestellten Ansätze zur Prozessregelung versuchen über die Konstanz eines Prozessparameters oder einer Prozesskennzahl auch die damit verknüpften Qualitätskriterien konstant zu halten. Auf Grund der Wechselwirkungen zwischen Prozessführung, Störgröße und Kennzahlbildung zur Regelung verbessern diese Konzepte zwar die Prozess- und Produktqualität, sind bei komplexen Anwendungen aber nicht ausreichend. Als Konsequenz werden bei der adaptiven Prozessführung die Modellparameter an den Prozess angepasst. Zum Teil ist hier auch eine Rückführung der Produktqualität im laufenden Prozess möglich, zumindest aber bei der Kalibrierung der Modelle eine notwendige Voraussetzung. Nachteilig ist, dass häufig bei der Kalibrierung die Störgrößeneinflüsse bekannt sein müssen.

#### 3.3.4.1 Bildung rheologischer Kennzahlen im Spritzgießprozess

Die große Bedeutung des rheologischen Materialverhaltens für die Prozessführung und Bauteilqualität sind vielfach belegt [Be93]. Um dieses Verhalten mit einer hohen Detaillierung online zu überwachen, sind Messdüsen zur Bestimmung rheologischer Kennzahlen entwickelt worden. Durch zusätzliche Druck- und Temperatursensoren kann über die anliegende Druckdifferenz, die Schubspannungen im geometrisch bekannten Fließkanal und dem Temperaturprofil auf die Viskosität geschlossen werden [Go05]. Alternative Ansätze bestimmen rheologische Prozesskennzahlen durch zusätzliche Druck- und Temperatursensorik im Werkzeug [BKS13, BZ10, Kö14]. Auf diese Weise ist eine online Überwachung des Materialzustandes möglich und kann bei der Prozessführung berücksichtigt werden. Die rheologischen Prozesskennzahlen sind in adaptiven Ansätzen zur Prozessregelung integriert worden. Bei [Ca05] wird eine Prozessregelung vorgestellt, bei der die Plastifizierparameter entsprechend der Materialviskosität nachgeführt werden. Die Untersuchungen stützen sich auf die Differenzierung der Fließeigenschaften von neuem Material im Vergleich zu Mahlgut durch eine HKV-Analyse. Die Messungen im Spritzgießprozess finden durch eine zusätzliche mit Sensoren ausgestattete Düse statt und werden entsprechend der Regelstrategie zur Anpassung der Plastifizierparameter verwendet. Eine breite Anwendung in der Praxis ist auf Grund des kostenintensiven Mehraufwandes für die Düsen und Sensorik sowie deren Störanfälligkeit bisher nicht abzusehen. [Go05, Ma08, PJ11, RF07]

#### 3.3.4.2 Produktadaptive Regelung

Die produktadaptive Regelung nutzt die Abbildung des Spritzgießprozesses in einem Prognosemodell zur Herstellung von Zusammenhängen zwischen Produktqualität und Prozessbedingungen. Bei gegebenem Prozessmodell wird eine detektierte Änderung einer Prozessgröße auf eine Adaption der Maschineneinstellparameter zurückgeführt. In [Va96] wird ein statistisches Prozessmodell vorgestellt das eine Optimierung der Maschineneinstellparameter auf Basis von referenzierten Qualitätsparametern und Prozesskennzahlen vorsieht. Dabei werden nach Ablauf einer bestimmten Zeit die Messwerte durch das Qualitätsmodell neu bewertet und falls nötig eine weitere Adaption der Parameter vorgenommen. Der Nachteil an dieser Methode liegt in der nicht kontinuierlich überwachten Qualität und damit der nur indirekten Zuordnung qualitätsbestimmenden Parameter. Die online Erfassung von zu regelnden Qualitätsgrößen stellt eine weitere Gruppe von Methoden dar. In [Hü85] werden über lineare Modellbildung Prozessmodelle erstellt, die einen bestimmten Prognosesollwert einer ausgewählten Qualitätsgröße, z.B. die Bauteilmasse, mit dem online erfassten Istwert vergleichen. Unter Zuhilfenahme eines PID-Reglers wird anschließend die Differenz ausgeregelt. Dabei werden einzelnen Qualitätsmerkmalen separate Stellgrößen zugewiesen.

#### 3.3.4.3 Adaptive Regelung auf Basis von im Werkzeug ermittelter Materialdaten

Die Formteilbildung beim Spritzgießen ist durch den Verlauf der Größen Druck, spezifisches Volumen und Temperatur in der Kavität geprägt. In verschiedenen Regelkonzepten wird dies als Basis einer an das Materialverhalten angepassten Prozessführung genutzt, um das Bauteilgewicht resultierend aus dem spezifischen Volumen konstant zu halten. Die Prozessführung wird, wie im  $p$  $v$  $T$ -Diagramm in Abbildung 3-4 beschrieben, durchgeführt. [Gr05, He77, LB+89, MG05, MSL08]

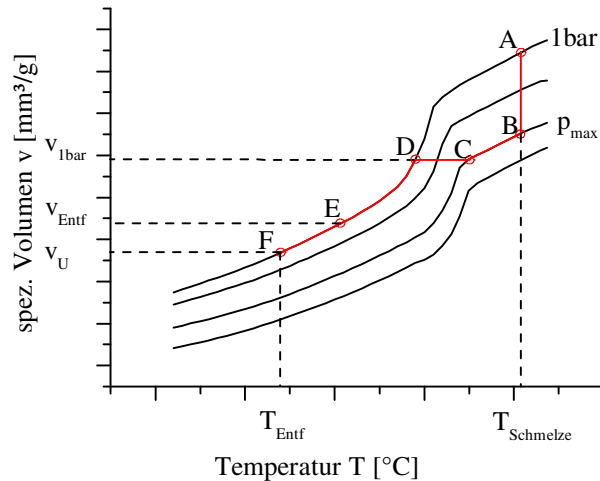


Abbildung 3-4 *pvT-Diagramm mit den idealisierten Prozessschritten A-B: Einspritzen und Kompression, B-C: isobare Prozessführung, C-D: isochore Prozessführung, ab D: isobare Abkühlung, E: Entformung*

Das Ziel dieser Prozessführung ist eine konstante volumetrische Schwindung und ein konstantes Bauteilgewicht über alle Produktionszyklen zu erlangen. Dafür soll zum Zeitpunkt des Erreichens der 1-bar-Linie ein konstantes, spezifisches Volumen des Kunststoffes sichergestellt sein. Der Werkzeuginnendruck dient als Regelgröße für eine isochore Abkühlphase, wobei von einer konstanten Temperatur in der Einspritzphase ausgegangen wird. Zur Einstellung eines konstanten Bauteilgewichtes wird die isobare Nachdruckphase an die aktuelle Prozesssituation angepasst. [Gr05, He77, MHG04, MHR11]

Zur Ermittlung der Materialparameter und Kalibrierung wird die Spritzgießmaschine als Messinstrument verwendet. Anhand von Stützstellen bei relevanten Betriebspunkten wird ein Kennfeld für das spezifische Volumen bei entsprechendem Prozessdruck über das Wiegen der Bauteile und das Kavitätsumfang erstellt [MSL08, Sc11]. In [MHR11] wird eine Erweiterung des Konzeptes um ein inkrementelles Kühlsystem vorgestellt, das den Druckverlust in der Werkzeugkavität ausgleichen soll. Zur Ableitung der Modellzusammenhänge werden vielfach empirische Modelle auf Basis neuronaler Netze verwendet. Auf Grund des hinterlegten Materialverhaltens ist eine Reaktion auf eine Änderung in der Materialkonditionierung, Materialzusammensetzung oder den Materialeigenschaften durch Chargenschwankungen alleine durch die *pvT*-Regelung nicht möglich. In [HR14] wird eine Erweiterung der *pvT*-Regelung durch einen modellgestützten prädikativen Regler zum Ausgleich von Viskositätsschwankungen vorgestellt. Durch zwei Druck- und Temperatursensoren in der Kavität können Unterschiede in der Viskosität detektiert werden, um anschließend durch die Regelung zu einer Druckanpassung für ein konstantes Bauteilgewicht zu führen.

#### 3.3.4.4 Parameterbasierende Optimierung durch Prozesswissen

Um variierendem Werkstoffverhalten bei der Prozessregelung Rechnung zu tragen, werden in parameterbasierten Optimierungen Regelstrategien über Kombinationen von Prozesskennzahlen ermittelt. Die Modellbildung erfolgt über eine Regressionsanalyse. Die Ableitung der Regelstrategien fordert die Integration von Prozesswissen, um die Kompensationsstrategien auf die Störungen abzustimmen. Hierbei sollte große Sorgfalt auf die Modellaufbereitung gelegt werden, die im Gegensatz zu der Modellerstellung mit neuronalen Netzen nicht automatisch abläuft. Ein Vorteil ist allerdings, dass generalisierte Ansätze abgeleitet werden können. In diesem Bereich sind Ansätze bekannt, die auf Prozesseinflüsse durch Materialkonditionierung und Chargen eingehen. [Sc09, Uj99, WS07, WSF08]

Bei [Uj99] wird der Prozess in die drei Phasen Plastifizieren, Einspritzen und Nachdruck unterteilt. In der Plastifizierphase werden Kennzahlen gebildet, die das Materialverhalten beschreiben. In der Einspritzphase wird eine weitere Kennzahl zur Vertiefung dieser Kenntnisse gebildet, die über das Prozessmodell für eine Optimierung kombiniert werden. Mit Hilfe dieser Informationen wird ein Sollwert für die Nachdruckhöhe

errechnet und entsprechend ausgeregelt. Auf diese Weise wird den Einflüssen insbesondere durch veränderte rheologische Eigenschaften des Materials durch Chargenschwankungen auf das Bauteilgewicht entgegen gewirkt.

Ebenfalls auf das Bauteilgewicht und Prozesseinflüsse durch veränderte rheologische Materialeigenschaften geht ein in [Sc09] vorgestellter Ansatz ein. Durch unterschiedliche Materialkonditionierung hervorgerufene Prozessstörungen werden in einem Regressionsmodell abgebildet. Durch eine Kombination von Kennzahlen aus der Plastifizier- und Einspritzphase eines Zyklus werden in einem Prognosemodell die Auswirkungen auf das Bauteilgewicht und die notwendige Adaption des Nachdrucks zur Kompensation bestimmt. Insbesondere die hohe Messauflösung bei energetischen Kennwerten und die Präzision elektrisch angetriebener Anlagen ermöglichen eine sehr gute Korrelation des Bauteilgewichtes mit den Prognosewerten. Die Stellgröße Nachdruckhöhe wird automatisch über das Prozessmodell berechnet, muss aber manuell in der Anlagensteuerung angepasst werden. [Sc09]

### 3.3.4.5 Adaptive Prozessregelung durch Referenzprozesse

Die in den Untersuchungen zu parameterbasierten Optimierungen erarbeiteten generellen Ansätze bieten die Grundlage für die Integration adaptiver Prozessregelungen in die Maschinensteuerung. Das Prozesswissen wird durch allgemeine Optimierungsansätze in der Steuerung hinterlegt. Die bisher vorgestellten Regelkonzepte benötigen eine Kalibrierung der Modelle anhand von Versuchsreihen, Beispielzyklen und gezielt eingebrachten Prozessstörungen. Um die in den Modellen entwickelten generellen Kompensationsmöglichkeiten ohne eine aufwändige Versuchsreihe in eine Prozessregelung zu integrieren, beziehen sich aktuelle Qualitätsregelungen auf Referenzprozesse. Die detektierten Abweichungen von den hinterlegten Prozessparametern oder Prozessparameterverläufe werden über hinterlegte Algorithmen durch eine adaptive Anpassung des Umschaltpunktes und der Nachdruckhöhe ausgeglichen. [HS+14, Pi12, PGS12, Ra13, Sc14]

Das in [PGS12] dargestellte Konzept überwacht online den Druckverlauf über der Schneckenposition und Einspritzzeit. Dabei wird insbesondere ein Abgleich mit einer Referenzkurve im Hinblick auf eine Verschiebung der Kurve entlang der Zeitachse und Änderungen in der Steigung der Druckkurve durchgeführt. Die detektierten Abweichungen vom Referenzverlauf werden verwendet, um die Prozesskennzahlen Einspritzvolumen, Viskositätsänderung und Übereinstimmung im Druckverlauf zu bilden. Die Kompensationsstrategie sieht eine Anpassung des Einspritzprofils und des Umschaltpunktes vor, damit ein Umschalten auf Nachdruck bei gleichem Füllgrad und Volumenstrom wie im Referenzverlauf erfolgt. [Pi12, PGS12, Ra13]

Ein ebenfalls auf einem gelernten Betriebspunkt basierendes Konzept wird in [HS+14, Sc14] vorgestellt. In diesem Fall wird ein Integral in der Einspritzphase mit einem referenzierten Bereich verglichen und der Umschaltpunkt adaptiert. Das Referenzintegral wird über einen entsprechenden, gelernten Betriebspunkt in der Einspritzphase festgelegt. Die Grenzen des Integrals werden automatisch gesetzt und entsprechend dem Schließverhalten der RSP angepasst. Das Integral wird in Kombination mit der Schneckenvorschubgeschwindigkeit zur Berechnung des *Viskositätsindex* (VI) herangezogen. Ein zweites Druckintegral, der *Füllindex* (FI), wird innerhalb der Einspritzphase zwischen dem detektierten Zeitpunkt des Schließens der RSP und dem adaptiven Umschaltpunkt gebildet. Über das Verhältnis zwischen Füllindex und dem Viskositätsindex wird ein *Masseäquivalent* (MPV) abgeleitet. Damit dies konstant ist, wird bei Viskositätsunterschieden und entsprechenden Differenzen im Druckverlauf der Einspritzphase der Umschaltpunkt adaptiert. Eine Erweiterung des Konzeptes beinhaltet eine zusätzliche Anpassung der Nachdruckhöhe entsprechend der detektierten Viskositätsunterschiede.

### 3.4 Bewertung des Kenntnisstandes

Die zunehmende Detaillierung von Messdaten sowie deren direkte Überführung in der Anlagensteuerung in Kennzahlen ermöglicht eine sehr gute Prozesscharakterisierung mit aktueller Anlagentechnik [Ho12, HBK11]. Robuste Prozesseinstellungen reduzieren die Störungsanfälligkeit, sind aber keine Garantie für eine konstante Qualität der Bauteile. Ohne ein Qualitätsregelungskonzept werden die Maschineneinstellparameter lediglich reproduziert, aber nicht an die variierenden Prozessbedingungen angepasst. Regelkonzepte, die prozessparameter- oder prozesskennzahlbasiert umgesetzt werden, haben einen positiven Einfluss auf die Konstanz der Prozessführung, sind jedoch durch die aufwändige Kalibrierung und geringe Eingrifftiefe für komplexe Qualitätsanforderungen nicht geeignet. Die Verwendung zusätzlicher Sensorik und Messdüsen bildet zwar einen sehr guten Zusammenhang zum aktuellen Materialzustand und der Verarbeitung, ist aber durch die hohe Anfälligkeit, Kalibrieraufwand und kostenintensive Anschaffung für die Produktion nicht optimal geeignet.

Die erwähnten Regelkonzepte auf Basis des referenzierten Werkstoffverhaltens können Störungen durch die Maschinenfähigkeit auffangen, sind aber insbesondere bei Einflüssen durch ein variierendes Materialverhalten unzureichend. Hier greifen die Regelkonzepte mit Bezug zu Referenzprozessen und integrierten, generellen Kompensationsätzen über Prozesswissen einen wichtigen Punkt auf. Über diese Regelstrategie kann die Maschinenfähigkeit in Bezug auf Störungen beispielsweise durch die Rückströmsperre verbessert und gleichzeitig das Materialverhalten in das Konzept integriert werden. Mit Bezug zum Bauteilgewicht als Qualitätskriterium sind hierdurch Verbesserungen in der Konstanz trotz Schwankungen in den Eingangsgrößen möglich. Der Forderung nach einer werkstoffbasierten Prozesskontrolle und Regelung wird damit zunehmend Rechnung getragen [FRS04]. Allerdings werden bei diesen Konzepten bisher keine Kriterien in Bezug auf die Optik der Bauteile, Konstanz im Druck- und Temperaturprofil des Massestroms sowie die Ausbildung der Bauteilmorphologie berücksichtigt. Die optischen Eigenschaften und Anforderungen von Bauteilen sind ein zunehmend wichtiger Faktor in aktuellen Produktionen. Dabei ist der Zusammenhang zwischen Werkstoffsystem, Werkzeuggestaltung und Prozessführung sehr komplex und die Bandbreite an Defekten sehr weit gefächert. Die Defekte reichen von Fließmarkierungen, Bindenähten bis hin zu Feuchtigkeitsschlieren oder Verfärbungen. [GB+02, HIL10, HJ+08, IBR09, Th02]

Insbesondere vor dem Hintergrund hybrider Fertigungsprozesse und der Kombination von Verfahrensabläufen aus der Kunststoffverarbeitung, Reaktionstechnik und weiteren Veredelungsschritten ist die Beherrschung der Prozessführung sowie von Einflüssen auf die Bauteilmorphologie als Schnittstellenanforderung zunehmend entscheidend. Durch die thermodynamischen und verfahrenstechnischen Abläufe wird ein wichtiger Einfluss auf die Ausbildung der Qualitätskriterien ausgeübt [Br06]. Aus diesem Grund ist die Kenntnis zu den Einflüssen aus der Maschinenfähigkeit sowie der Variationsbandbreite des Werkstoffverhaltens und die Übertragung auf Prozesseinflüsse ein wichtiger Schritt. Abgeleitet aus diesen Grundlagen kann über eine gezielte Prozesscharakterisierung eine generelle Regelstrategie erarbeitet werden, die unter Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens und der Maschinenfähigkeit, die Anforderungen in Bezug auf das Bauteilgewicht, Konstanz im Massestromtemperaturprofil, den Anforderungen an die Bauteiloberfläche und Morphologieausbildung unter Druck- und Temperatureinflüssen mit einer adaptiven Prozessführung sicherstellt.

Im Bereich der Bauteiloberfläche sind insbesondere Sichtprüfungen aktueller Stand in der Produktion. Allerdings sind erste Erkenntnisse zu Kennzahlauswertungen optischer Messsysteme und der Charakterisierung von Oberflächen verfügbar [Ba06, BG+13, GB+12, MG+13]. Die Zusammenhänge zwischen der Abformgenauigkeit, Einfallstellen durch Schwindung und der Prozessführung sind zunehmend erfasst und in Korrelation mit Regelkonzepten beschrieben [GB+11, PB+13]. Die Einflussbereiche, die in der Einspritzphase entstehenden Oberflächendefekte beispielweise durch Restfeuchteanteile beinhalten, sind in den Charakterisierungen dargestellt, aber bisher in Regelkonzepten nicht berücksichtigt. Für eine detaillierte Darstellung der Charakterisierungsmöglichkeiten der Oberflächen von Spritzgießteilen soll auf die nachstehende Literatur [Ba06, BF+14b, BF+14c, BG+13, GB+11, GB+08, GB+12, LP00, MG+13, PB+13, SH12] verwiesen werden.

## 4 Qualitätsrelevante Materialeigenschaftsvariationen

Innerhalb des Spritzgießprozesses werden die Qualitätskriterien maßgeblich durch die Rohstoffeigenschaften bestimmt, wenn der aktuelle Stand der Maschinenfähigkeit vorausgesetzt wird. Die beschriebenen Einflüsse durch Alterung werden im Folgenden im Hinblick auf ihre Prozessrelevanz untersucht und Beispiele für mögliche Materialeigenschaftsvariationen und deren Ausprägung vorgestellt. Diese Einflussfaktoren sind nach Möglichkeit isoliert voneinander zu evaluieren und durch geeignete Messtechnik zu erfassen. Die entscheidenden Einflussfaktoren auf das Materialverhalten und die Alterung des Materials im Hinblick auf eine Veränderung der chemischen oder physikalischen Struktur sind Zeit, Temperatur, der Restfeuchtegehalt sowie die eingebrachte Scherbelastung. Auch wenn die Herstellervorgaben bezogen auf die Restfeuchteanteile eingehalten werden, können unzulässige Qualitätseinflüsse durch Eigenschaftsvariationen auftreten. Diese Variationsbandbreite ist zu erfassen und in einem generellen Ansatz zu beschreiben. Die bereits erwähnten Alterungseffekte durch Zeit- und Temperatureinfluss sind beim Spritzgießen vor dem Hintergrund von Verweilzeiten in der Plastifiziereinheit zu betrachten. Die zu erwartenden Reaktionen reichen von einer Degradation der Polymerketten durch thermisch sowie hydrolytisch unterstützte Prozesse bis hin zu einer Zunahme der Kettenlänge und Verzweigung durch Nachkondensation [BC+13].

### 4.1 Betrachtete Polymertypen

Zur Darstellung der Variationsbreite bei der Veränderung der Materialeigenschaften durch Alterungseffekte werden beispielhaft folgende Materialien herangezogen:

- Polyamid 6,
- Polybutylenterephthalat,
- Polycarbonat,
- Acrylnitril-Butadien-Styrol.

Die genaue Typenbezeichnung und Verarbeitungshinweise sind der Darstellung der verwendeten Messmittel und Materialien im Anhang in Kapitel 10 zu entnehmen. Die Materialien haben eine aktuell sehr hohe Prozessrelevanz bei der Herstellung technischer Bauteile mit höchsten Anforderungen an die Maßhaltigkeit, mechanische Eigenschaften, Oberflächeneigenschaften, Bauteilmorphologie sowie Transparenz. Gleichzeitig sind hydrophile Polykondensate und Polyester kritisch in Bezug auf Feuchtigkeitsaufnahme vor der Verarbeitung und unterliegen Alterungseffekten, wie thermisch induzierter Depolymerisation oder Nachkondensation. Eine Darstellung der chemischen Eigenschaften der jeweiligen Polymere wird in der Diskussion der Untersuchungen aufgeführt. Zu beachten ist, dass jede der verwendeten Polymertypen spezifische Eigenschaften und Modifikationen durch Additivierung unterliegt, wenn auch nur in geringen Maßen. Außerdem werden durch die Wahl der Polymertypen sowohl teilkristalline als auch amorphe Polymere in der Analyse berücksichtigt.

### 4.2 Erfassung rheologischer Materialparameter

Rheometer sind Messgeräte, die zur Bestimmung des viskoelastischen Fließverhaltens von Flüssigkeiten, durch Scherung oder Dehnung dieser Flüssigkeiten, verwendet werden. Innerhalb dieser Arbeit wird ein Fokus auf Scher-Rheometer sowie die Untersuchung der Scherviskosität gelegt. Unterschieden wird hierbei in eine stationäre Scherung des Materials in einem Kapillarrheometer und der rotatorischen oder oszillatorischen Scherung in einem Rotationsrheometer. Rotationsrheometer eignen sich insbesondere zur Erfassung des Fließverhaltens bei niedrigen Scherraten in einem Bereich bis ca.  $500\text{s}^{-1}$ . Kapillarrheometer sind für die Erfassung von hohen Scherraten von über  $10000\text{s}^{-1}$  geeignet. Bei niedrigen Scherraten nimmt die Messgenauigkeit materialspezifisch bei diesem Messprinzip deutlich ab. Für eine detaillierte Darstellung der Messprinzipien und möglicher Geräteausführungen soll auf die folgende Literatur [CCD97, CM96, GA05, PGL91, VI12] verwiesen werden.

Auf die hinreichend bekannten Verfahren bei der Korrektur von stationären Messdaten in einem Kapillarrheometer wird an dieser Stelle nicht eingegangen. Eine Darstellung der Korrekturverfahren sowie deren Anwendung sind in [DE86, PGL91, PGL83] aufgeführt. Auf Grund der niedrigen Viskosität von Polymeren für den Einsatz im Spritzgießprozess ist die Scherratenkorrektur zur Übertragung Newtonsch gemessenen Fließverhaltens in den strukturviskosen Bereich entscheidend. Hier wird auf das Weißenberg-Rabinowitsch-Verfahren zurückgegriffen, bei dem über eine punktweise durchgeführte Differenzierung des Druckgradienten bzw. der Schubspannung die Viskositätskurve korrigiert wird [DE86].

Zur Erfassung des gesamten in der Spritzgießverarbeitung relevanten Schergeschwindigkeitsbereiches ist eine Kombination des oszillierenden und des stationären Messverfahrens notwendig. Bedingt durch die zwei Messprinzipien können die Fließeigenschaften abhängig von der auftretenden *Schergeschwindigkeit*  $\dot{\gamma}$  oder der anliegenden *Winkelgeschwindigkeit* bzw. *Kreisfrequenz*  $\omega$  gemessen werden. Die notwendigen Ansätze zur Kombination beider Messverfahren und die Übertragung der erfassten Größen in eine Fließkurve sind für jedes Material zu überprüfen. Hier ist insbesondere die Übertragung der kreisfrequenzabhängigen *komplexen Viskosität*  $\eta^*$  in die schergeschwindigkeitsabhängige Fließkurve durch die Cox/Merz-Relation von Bedeutung. [GA05]

Die empirische Cox/Merz-Relation besagt, dass der Betrag der komplexen Viskosität  $\eta^*$  bei oszillierender Beanspruchung der dynamischen Viskosität  $\eta$  bei stationärer Scherströmung entspricht [CM58]. Jedoch unter der Bedingung, dass die Kreisfrequenz  $\omega$  der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  gleichzusetzen ist [PGL91]. Die folgende Formulierung verdeutlicht den Zusammenhang, abgeleitet aus dem *komplexen Schubmodul*  $G^*$ , der sich aus dem *Speichermodul*  $G'$  des elastischen Verformungsanteils sowie dem *Verlustmodul*  $G''$  für den viskosen Anteil ergibt.

$$|\eta^*| = \eta(\dot{\gamma} = \omega) = \frac{|G^*|}{\omega} = \frac{1}{\omega} \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

Formel 4-1      Betrag der komplexen Viskosität  $\eta^*$

Dementsprechend wird bei der Viskositätskurve für frequenzabhängige Größen die komplexe Viskosität doppelt logarithmisch über der Kreisfrequenz aufgetragen. Die Cox/Merz-Relation ist jedoch nicht uneingeschränkt gültig. Als empirisch ermittelter Zusammenhang gilt die Cox/Merz-Relation nur für Polymere mit einfacher Struktur, bei denen nur mechanische Wechselwirkungen zwischen den Makromolekülen auftreten. Die Cox/Merz-Relation ist für technische Polymere bereits belegt worden und wird somit zur Übertragung der oszillatorischen Messdaten in ein stationäres Fließverhalten genutzt [ABW92, Wi09]. Nichtsdestotrotz ist eine Überprüfung der Relation materialspezifisch notwendig, da durch Additive und Füllstoffe die Gültigkeit der Relation beeinflusst werden kann. [BL+83, KP80, Wi09]

#### 4.2.1 Versuchsaufbau und Messablauf

Die Charakterisierungen werden in kontinuierliche Untersuchungen des temperaturabhängigen Zeitverhaltens sowie Untersuchung der Konditionierungseinflüsse unterteilt. Durch die kontinuierliche, oszillatorische Belastung der Proben in einem Rotationsrheometer, bietet dieses Messverfahren sehr gute Möglichkeiten, Zeiteinflüsse auf die komplexe Viskosität bei unterschiedlichen Temperaturniveaus zu charakterisieren. Im Bereich des Spritzgießens sind Kurzzeiteffekte von Bedeutung, die sich im Bereich der Verarbeitungsrichtlinien, Verweilzeiten in der Plastifiziereinheit und kurzzeitigen Produktionsstopps befinden. Daher werden im Folgenden maximale Zeitbereiche von  $t_M \leq 30 \text{ min}$  betrachtet. Des Weiteren erlaubt der Scherratenbereich eine sehr detaillierte Beschreibung niedriger Scherraten bzw. Winkelgeschwindigkeiten. Auf Grund der zunehmenden Messgenauigkeit werden im Folgenden lediglich Winkelgeschwindigkeiten bis  $\omega = 100 \text{ s}^{-1}$  in die Auswertungen mit einbezogen. Durch die hohe Messempfindlichkeit in niedrigen Scherraten und das kontinuierliche Messprinzip können Einflüsse der Konditionierung auf den Nullviskositätsbereich sowie eventuelle zeitabhängige Effekte in Verbindung mit der Konditionierung evaluiert werden. Die temperierte Platte-Platte-



Geometrie des Messgerätes wird während der Messung in einer geschlossenen Kammer kontinuierlich mit Stickstoff umspült, um Einflüsse durch sauerstoffinduzierte Oxidation auszuschließen.

Für eine isolierte Betrachtung der Alterungseffekte ist eine thermisch homogene Schmelze notwendig. Andernfalls beeinflussen scherratenabhängige Homogenisierungseffekte die resultierenden Ergebnisse. Aus diesem Grund unterliegen die Proben einer *thermischen Ausgleichszeit* von  $t_{tA} = 3\text{min}$  und anschließend einer Homogenisierung, in der ein Winkelgeschwindigkeitsbereich von  $\omega = 10 - 500\text{s}^{-1}$  innerhalb von  $t_H = 2\text{min}$  durchlaufen wird. Um eine Beeinflussung durch die Scherung der vorangegangenen Messreihe auszuschließen, wird nach jedem Messdurchgang eine *stationäre Ausgleichszeit* von  $t_{sA} = 1\text{min}$  vorgegeben. Die bereits durch die Vorbereitung eingetretenen Alterungseffekte werden dadurch berücksichtigt, dass die erste dargestellte Messreihe bereits einem temperaturabhängigen Zeiteinfluss von  $t = 6\text{min}$  zu Beginn der Messung unterlag. Die Messdaten werden kontinuierlich erfasst, die angegebenen Zeitschritte sind somit dem jeweiligen Startzeitpunkt der Messreihe gleichzusetzen.

Durch die Messungen am Hochdruckkapillarviskosimeter werden die Daten des Rotationsrheometers für hohe Scherratenbereiche ergänzt. Das Hochdruckkapillarviskosimeter bietet keine Möglichkeit einer kontinuierlichen Betrachtung zeitabhängiger Alterungseffekte. Hier werden lediglich die Einflüsse von Temperatur und Materialkonditionierung abgebildet. Auch in diesem Fall ist nach Befüllung des Messzylinders eine Verdichtung des Materials während des Aufschmelzens notwendig. Außerdem wurde eine entsprechende thermische Ausgleichzeit vor jeder Messung eingehalten.

Um eine statistische Absicherung der dargestellten Effekte zu erzielen, wird jeder Versuchspunkt mit erfassten Daten von jeweils drei Proben als Mittelwert dargestellt. Eine Abhängigkeit, ob die jeweiligen Scherratenbereiche progressiv oder degressiv durchlaufen wurden, konnte durch Referenzmessungen ausgeschlossen werden. Die Reproduzierbarkeit sowie Fähigkeit der Messsysteme in Bezug auf die Streuungsbandbreite wurde vor den Versuchsreihen sichergestellt. Die Konditionierung des Materials auf entsprechende Restfeuchtelevels wurde über eine gezielte Trocknung und Lagerung erreicht. Zur Trocknung wurde ein Vakuumtrockenschrank verwendet, in dem das Granulat bei der materialspezifischen Temperaturvorgabe getrocknet wird. In einer kontrollierten Umgebung mit einer *Umgebungstemperatur* von  $T_U = 25^\circ\text{C}$  und einer *relativen Luftfeuchtigkeit* von  $f_U = 45 - 50\%$  wurden anschließend die Restfeuchtestufen konditioniert. Eine thermische Schädigung des Materials durch die Trocknung wird durch die Einhaltung der Temperaturgrenzen und Zeitvorgaben des Herstellers ausgeschlossen.

### 4.3 Chemische Strukturänderungen

Die Veränderung der chemischen Struktur von Polymeren ist zeit- und temperaturabhängig. Hinzu kommt die bereits angesprochene Abhängigkeit von der Homogenisierung über die eingebrachte Scherung im Aufschmelzprozess, die auf thermische Homogenisierungseffekte sowie die Molekülausrichtung zurückzuführen ist. Durch die entsprechende Probenvorbereitung kann dieser Effekt ausgeschlossen werden. Im Folgenden werden Veränderungen der Materialeigenschaften durch temperaturabhängige Zeiteinflüsse im niedrigen Scherratenbereich am Beispiel von Polycarbonat, Polybutylenterephthalat und Polyamid 6 diskutiert. Die untersuchten Temperaturniveaus sind an den Verarbeitungsbereichen der jeweiligen Materialien orientiert, um prozessrelevante Einflüsse abzubilden. Die Materialien wurden vor den Messungen auf den minimal zu erzielenden Restfeuchtegehalt konditioniert, um Einflüsse durch die Materialkonditionierung über verstärkte Hydrolyse-Effekte auszuschließen. Sollten hydrolytische Effekte in die an dieser Stelle diskutierten Reaktionen mit einfließen, so sind diese durch die nicht zu vermeidenden minimalen Restmengen an Feuchtigkeit nach der Trocknung bedingt. Diese können nicht isoliert betrachtet werden und werden daher in dieser Diskussion zur thermischen Beständigkeit eingegliedert.

#### 4.3.1 Thermische Beständigkeit

Das untersuchte Polycarbonat zeigt innerhalb der analysierten Zeit- und Temperaturbereiche eine sehr hohe thermische Stabilität. Der erfasste Winkelgeschwindigkeitsbereich zeigt ein rein Newtonsches Verhalten, entsprechend der temperaturabhängigen Nullviskosität des Materials. Die in Abbildung 4-1 dargestellten Verläufe beschreiben das thermisch induzierte Verhalten der Nullviskosität an der unteren und oberen Temperaturgrenze des Verarbeitungsbereichs. Die Glasübergangstemperatur ist mit  $T_G = 145^\circ\text{C}$  angegeben.

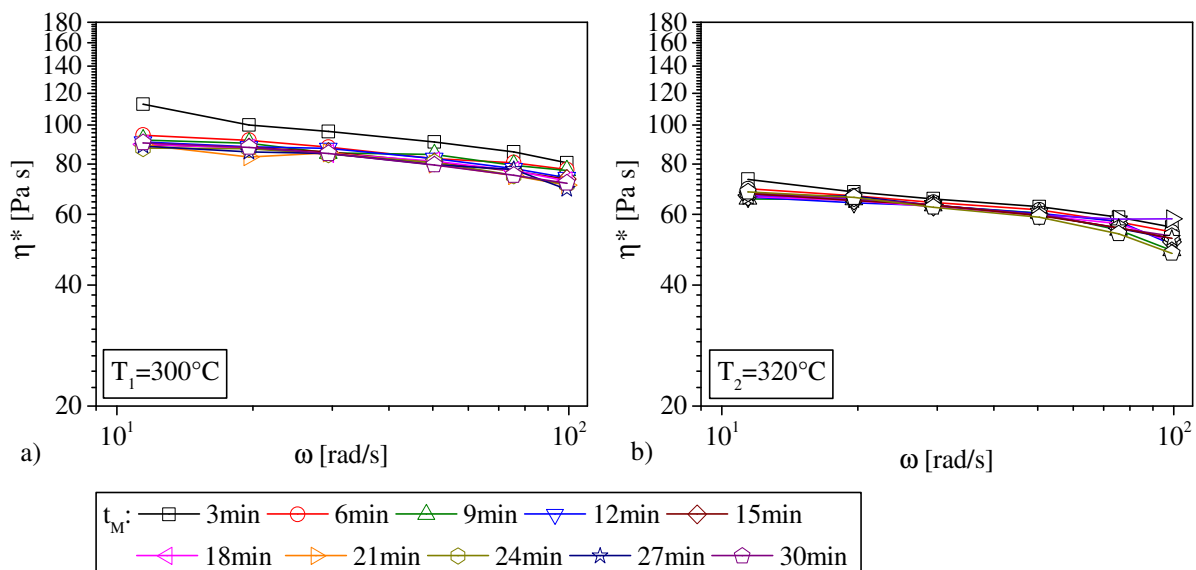


Abbildung 4-1 Temperaturabhängiger Zeiteinfluss auf die komplexe Viskosität von PC bei a)  $300^\circ\text{C}$  und b)  $320^\circ\text{C}$

Die Darstellung verdeutlicht die Effekte der Temperaturverschiebung sowie der Homogenisierung. Zum einen ist ein deutlicher Temperatureinfluss auf die Nullviskosität erkennbar, der sich mit den Ergebnissen der dargestellten Untersuchungen zum Temperaturverschiebungsfaktor aus der Literatur deckt. Insbesondere bei der niedrigen Temperaturstufe sind innerhalb der ersten Messreihen Effekte der Homogenisierung durch die kontinuierliche Scherung in einer Annäherung an ein konstantes Nullviskositätsniveau nach  $t_M = 9\text{min}$  erkennbar. Diese Konstanz stellt sich bei der höheren Temperaturstufe deutlich schneller ein, da durch die geringere Viskosität eine Homogenisierung schneller über die eingebrachte Scherung stattfinden kann. Das konstante Niveau der Nullviskosität, abhängig von der Temperaturstufe, bis einschließlich  $t_M = 30\text{min}$  verdeutlicht die

thermische Beständigkeit des Materials innerhalb des betrachteten Bereiches. Es findet innerhalb des betrachteten Temperatur- und Zeitbereiches keine signifikante Veränderung der chemischen Struktur statt. Ein Einfluss auf die Kettenlänge würde sich direkt auf die Viskosität auswirken.

### 4.3.2 Degradation und thermisch induzierter Kettenabbau

Innerhalb der untersuchten Polymere sind Degradationseffekte insbesondere bei Polybutylenterephthalat zu erwarten. Unter Zeit- und Temperatureinfluss können die Esterverbindungen gelöst werden und zu einer Reduktion der Kettenlänge führen. Im Folgenden wird die Prozessrelevanz dieser Reaktion analysiert.

In Abbildung 4-2 sind die Einflüsse von Zeit und Temperatur auf die Veränderung der Viskosität von Polybutylenterephthalat dargestellt. Der erfasste Winkelgeschwindigkeitsbereich zeigt ein rein Newtonsches Verhalten, innerhalb der am Verarbeitungsbereich orientierten Temperaturstufen von  $T_1 = 260^\circ\text{C}$  und  $T_2 = 270^\circ\text{C}$  bei einer angegebenen Schmelztemperatur von  $T_S = 225^\circ\text{C}$ .

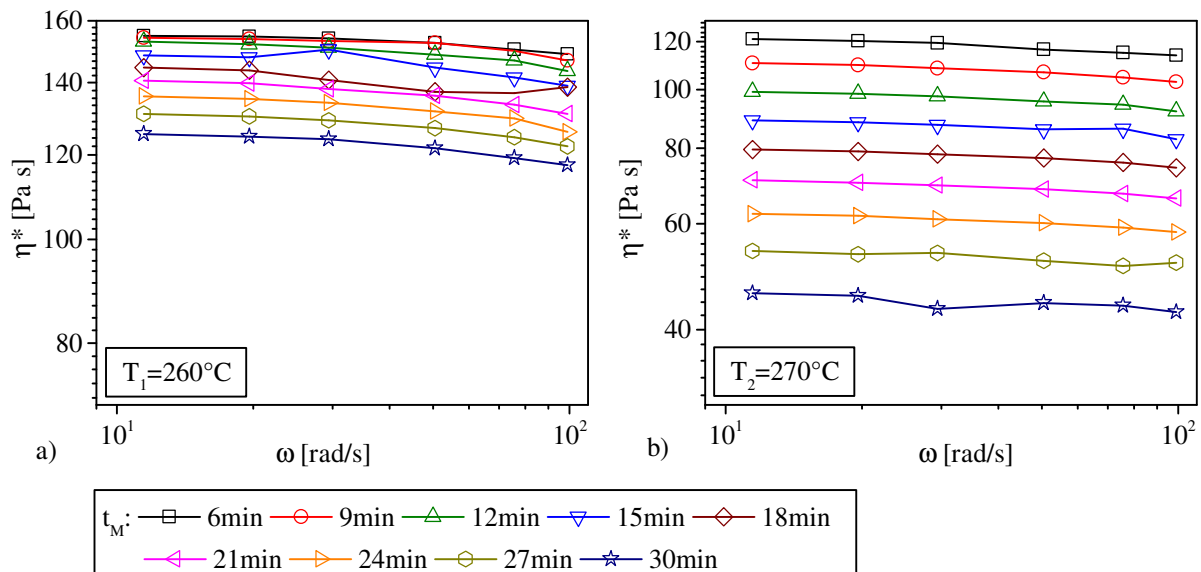


Abbildung 4-2 Temperaturabhängiger Zeiteinfluss auf die komplexe Viskosität von PBT bei a)  $260^\circ\text{C}$  und b)  $270^\circ\text{C}$

Die zu erwartende Temperaturverschiebung der Materialviskosität kann auch in diesem Fall bestätigt werden. Bei zeitgleichen Zeitintervallen wird mit steigender Temperatur die Viskosität reduziert. Des Weiteren implizieren die erfassten Datensätze eine kontinuierliche, thermische Reduktion der Polymerkettenlänge und damit eine Verringerung der Viskosität über der Messzeit. Auf dem unteren Temperaturniveau ist die Reduktionsrate noch gering und zeigt erst nach  $t_M = 12\text{min}$  eine signifikante Abnahme des Nullviskositätsniveaus zu Beginn der Messreihe. Anschließend senkt sich dieses Niveau kontinuierlich weiter ab. Auf der hohen Temperaturstufe finden die Effekte beschleunigt statt. Hier ist bei jedem Zeitschritt eine deutliche Viskositätsabnahme festzustellen.

Polybutylenterephthalat gehört als linearer thermoplastischer Polyester aus aromatischen Dicarbonsäuren und aliphatischen Diolen zu der Gruppe der Polyalkylenterephthalate. Dabei ist Polybutylenterephthalat ein Produkt der Polykondensation von Terephthalatsäure oder Umesterung von Terephthalatsäuredimethylestern. Die Polykondensation ist als Gleichgewichtsreaktion reversibel. Unter dem kontinuierlichen Temperatureinfluss werden während der Messung bereits in dieser kurzen Zeitspanne die Esterstrukturen aufgebrochen und die Kettenlänge der Polymerstruktur verringert. Dies beeinflusst den Fließwiderstand der Probenkörper. Die Degradation ist dabei stark temperaturabhängig und verläuft bei steigender Temperatur beschleunigt. Die temperaturabhängige Verstärkung der dargestellten Degradation über der Zeit verdeutlicht Abbildung 4-3, in der die Abbaurate der Nullviskosität  $\Delta\eta^*$  zu Beginn der Messreihe je Zeitstufe über der

Messzeit  $t_M$  dargestellt ist. Die Abbaurrate je Zeitschritt ist bei höherer Temperatur auf einem allgemein höheren Niveau.

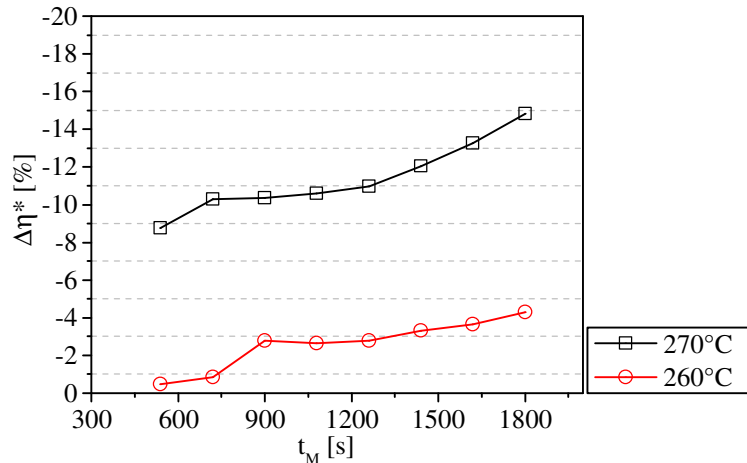


Abbildung 4-3 Zeit- und temperaturabhängige Abbaurrate der komplexen Nullviskosität von PBT

Die Abbaurrate zeigt, dass bei höheren Temperaturen mit verstärkter Degradation gerechnet werden muss. Somit ist von einem stark temperatur- und zeitabhängigen Verhalten des Materials auszugehen.

### 4.3.3 Nachkondensation und thermisch induzierter Kettenaufbau

Für Polyamide ist der Effekt der Nachkondensation über einen fortschreitenden Kettenaufbau als Langzeiteffekt bereits beschrieben worden [Mi14]. Unter Zeit- und Temperatureinflüssen neigen die reaktiven Kettenenden über freie Radikale zu einer Wachstumsreaktion. Die Prozessrelevanz dieser Reaktion ist in Abbildung 4-4 für ein Polyamid 6 innerhalb des Verarbeitungsbereiches für die Temperaturniveaus von  $T_1 = 260^\circ\text{C}$  und  $T_2 = 280^\circ\text{C}$  bei einer angegebenen Schmelztemperatur von  $T_S = 222^\circ\text{C}$  dargestellt.

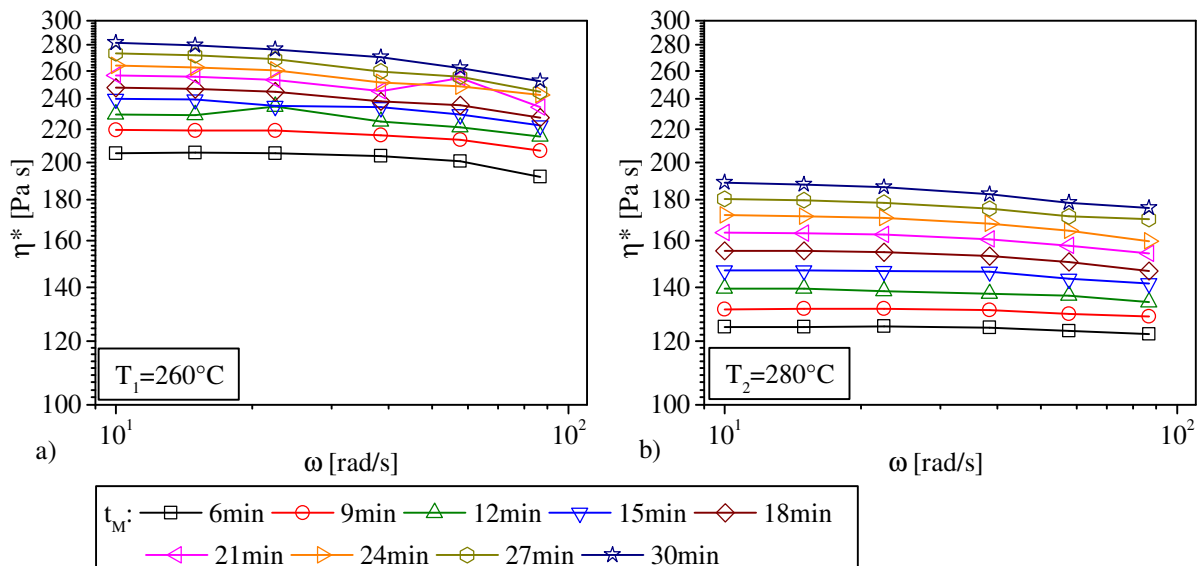


Abbildung 4-4 Temperaturabhängiger Zeiteinfluss auf die komplexe Viskosität von PA 6 bei a) 260 °C und b) 280 °C

Da die erfasste Viskosität je Zeiteinheit auf einem nahezu konstanten Niveau liegt, kann von einem temperaturspezifischen Nullviskositätsniveau ausgegangen werden. Auch für dieses Material kann der Temperaturverschiebungseffekt bestätigt werden, der eine Reduzierung der Viskosität bei steigender Temperatur beschreibt.

Allerdings sind im Vergleich zu den vorher dargestellten Untersuchungen zum thermischen Degradationsverhalten von PBT, die zeitbedingten Effekte gegenläufig. Über der Messzeit ist eine kontinuierliche Zunahme der Viskosität je Messreihe festzustellen.

Die kontinuierliche Zunahme des Nullviskositätsniveaus ist auf die bereits angesprochene Nachkondensation bei Polyamiden zurückzuführen. Der einsetzende Kettenaufbau oder eine Kettenverzweigung führt zu einer Erhöhung des Fließwiderstandes der Probe. Auch dieses Verhalten ist wiederum vom anliegenden Temperaturniveau abhängig. Zum einen ist durch die Temperaturverschiebung die initiale Nullviskosität beeinflusst. Zum anderen verdeutlicht Abbildung 4-5, dass gleichzeitig die Aufbaurrate durch die Temperatur bedingt wird.

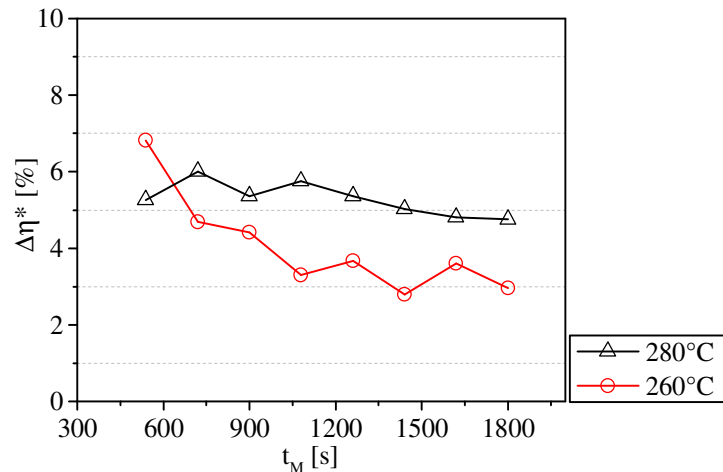


Abbildung 4-5 Zeit- und temperaturabhängige Aufbaurate der komplexen Nullviskosität von PA 6

Der Einfluss der Temperatur zeigt sich in diesem Fall durch eine Steigerung der Aufbauraten je Temperaturstufe. Es muss auf Grund der dargestellten Untersuchungen in der Literatur davon ausgegangen werden, dass sich dieser Aufbau einem Maximum annähert und über der Zeit die Aufbaurate abnimmt. Dies ist im relevanten Versuchsraum in Ansätzen durch eine leichte Abnahme der Aufbaurate über der Zeit erkennbar.

#### 4.4 Physikalische Strukturänderung

Durch die Konditionierung technischer Kunststoffe wird unter Vernachlässigung chemischer Reaktionen die physikalische Struktur beeinflusst. Insbesondere bei hydrophilen Polymeren ist der Restfeuchtegehalt ein entscheidender Faktor, der sich auf die Materialeigenschaften auswirkt und damit prozess- und qualitätsrelevant ist. Hinzu kommen chemisch hydrolytische Effekte, die eine Degradationsreaktion verstärken können. Beide Effekte sind entsprechend gesondert zu beschreiben um die Einflussstärke zu erfassen.

Der Einfluss der Materialkonditionierung kann sowohl am Rotationsrheometer also auch am HKV untersucht werden. Bei der Kombination der Datensätze ist die Gültigkeit der Cox/Merz-Relation zu prüfen. Eine identische Konditionierung im Hinblick auf Restfeuchtegehalt und thermische Belastung der jeweiligen Materialproben, wird durch den Versuchsablauf sichergestellt.

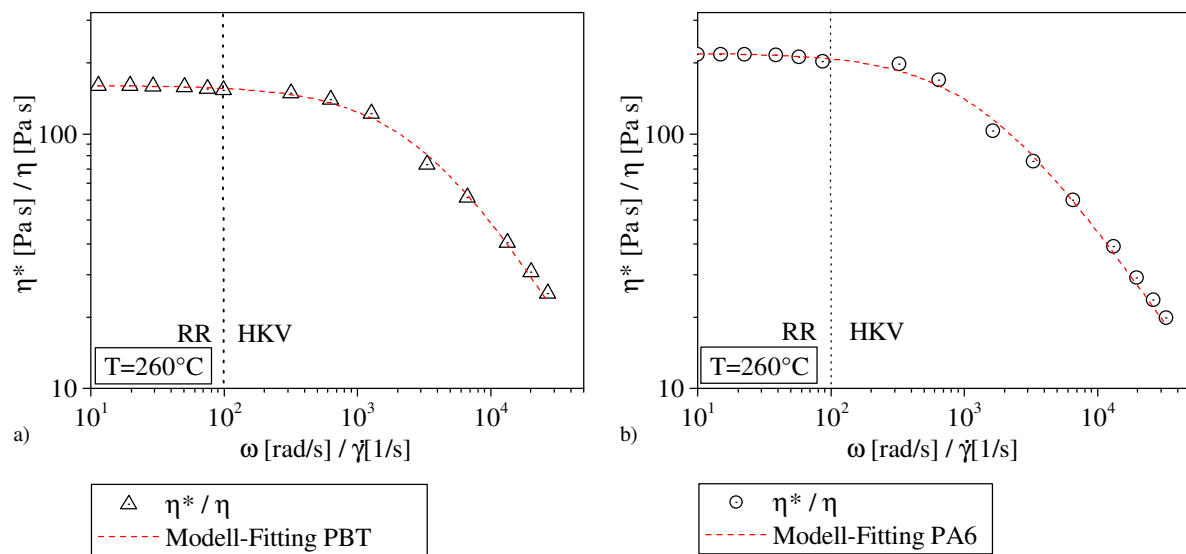


Abbildung 4-6 Messbereiche und Gültigkeit der Cox/Merz-Relation für a) PBT und b) PA 6

In Abbildung 4-6 sind die Messbereiche der jeweiligen Messprinzipien und die Zusammenfassung der Messpunkte in einem beschreibenden Modellansatz als Beleg der Cox/Merz-Relation für die Kombination der komplexen Viskosität über der Winkelgeschwindigkeit mit der Scherviskosität dargestellt. In der weiteren Diskussion wird diese Relation für die Kombination der Messungen bei identischer Konditionierung der Proben vorausgesetzt. Für eine detaillierte Darstellung der Modellansätze, insbesondere des Carreau-Ansatzes zur Beschreibung des Materialverhaltens soll auf Kapitel 2.3 sowie Kapitel 4.6 verwiesen werden. Für das untersuchte Polycarbonat konnte die Gültigkeit der Cox/Merz-Relation nicht bestätigt werden. In diesem Fall sind lediglich die untersuchten Phänomene je Messprinzip zu betrachten, da eine Kombination der Messverfahren keinen geschlossenen Kurvenverlauf bei der Darstellung der Viskositätswerte ergibt.

##### 4.4.1 Einfluss der Materialkonditionierung

Unabhängig von den dargestellten Temperatur- und Zeiteinflüssen, die sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Reduktion der Viskosität führen können, ist eine Abnahme der Viskosität durch eine erhöhte Restfeuchte im Material zu erwarten. Ausgehend von den in der Literatur bekannten Einflüssen von Restfeuchtigkeit im Spritzgießprozess, muss dieser Effekt sowohl bei PBT, PC als auch PA 6 erwartet werden. In Abbildung 4-7 ist der Einfluss unterschiedlicher Restfeuchtestufen auf die Nullviskosität von PBT und PA 6 bei 260 °C dargestellt.

Die Daten wurden im Rotationsrheometer erfasst. Auf Grund der Platte-Platte-Geometrie des Messgerätes wird davon ausgegangen, dass eine signifikante Ausgasung der Restfeuchte während der Messung nicht stattfindet. Die Reproduzierbarkeit der Messdaten belegt diese Annahme insbesondere unter Berücksichtigung der

Ergebnisse zu hydrolytisch verstärkter Degradation. Hier wäre bei variierendem Restfeuchteanteil mit deutlichen Schwankungen in den Messergebnissen bei identischer Konditionierung zu rechnen.

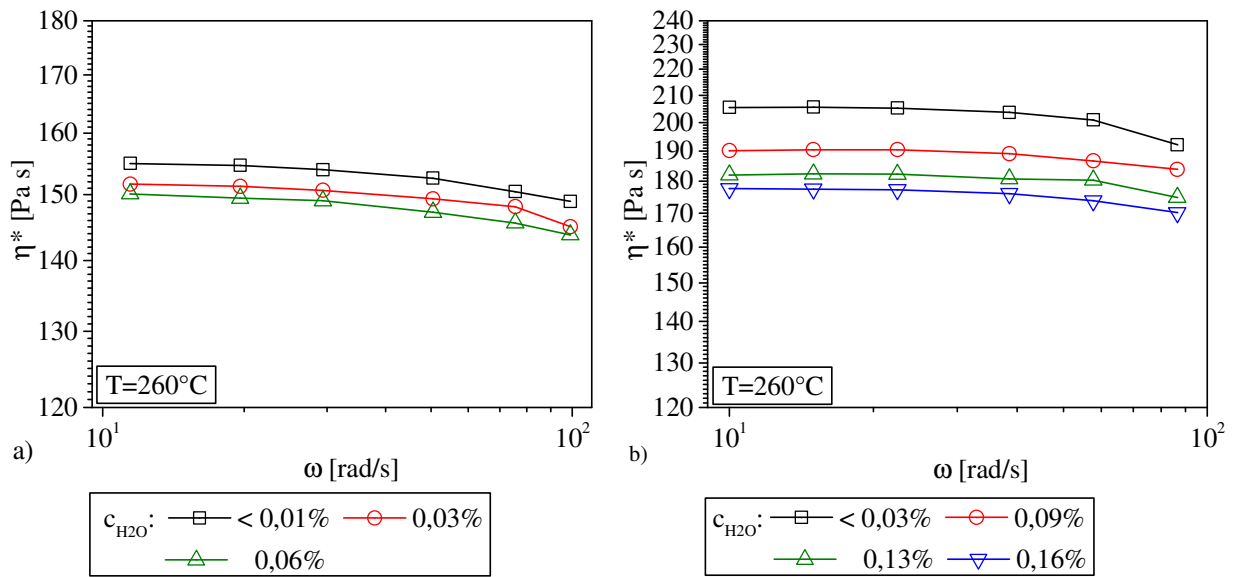


Abbildung 4-7 Einfluss der Materialkonditionierung auf die komplexe Viskosität bei  $260^\circ\text{C}$  von a) PBT und b) PA 6 im niedrigen Winkelgeschwindigkeitsbereich

Bei beiden Polymeren bewirkt die zunehmende Restfeuchte eine Abnahme des Nullviskositätsniveaus. Bezogen auf der physikalischen Struktur sind insbesondere Dipol- und Wasserstoffbrückenbindungen bei polaren Polymeren für den Zusammenhalt der Werkstoffmatrix und damit auch für das Viskositätsniveau zu berücksichtigen. Bei einer Veränderung der physikalischen Struktur ist mit einer Beeinflussung dieser Bindungskräfte zu rechnen. Lagern sich Wassermoleküle zwischen den Polymerketten im freien Volumen an, werden diese Bindungskräfte reduziert. Durch den sehr geringen Restfeuchteanteil wird das spezifische Volumen nicht messbar beeinflusst. Dennoch wird über die Wassermoleküle, und die damit veränderte Anordnung der Polymerketten, ein leichteres Abgleiten ermöglicht und die Anziehungskräfte und Interaktion der Ketten untereinander reduziert. Die Reduzierung der Viskosität kann durch eine Trocknung des Materials verhindert werden und ist daher als reversibler physikalischer Einfluss auf die Polymerstruktur einzuordnen.

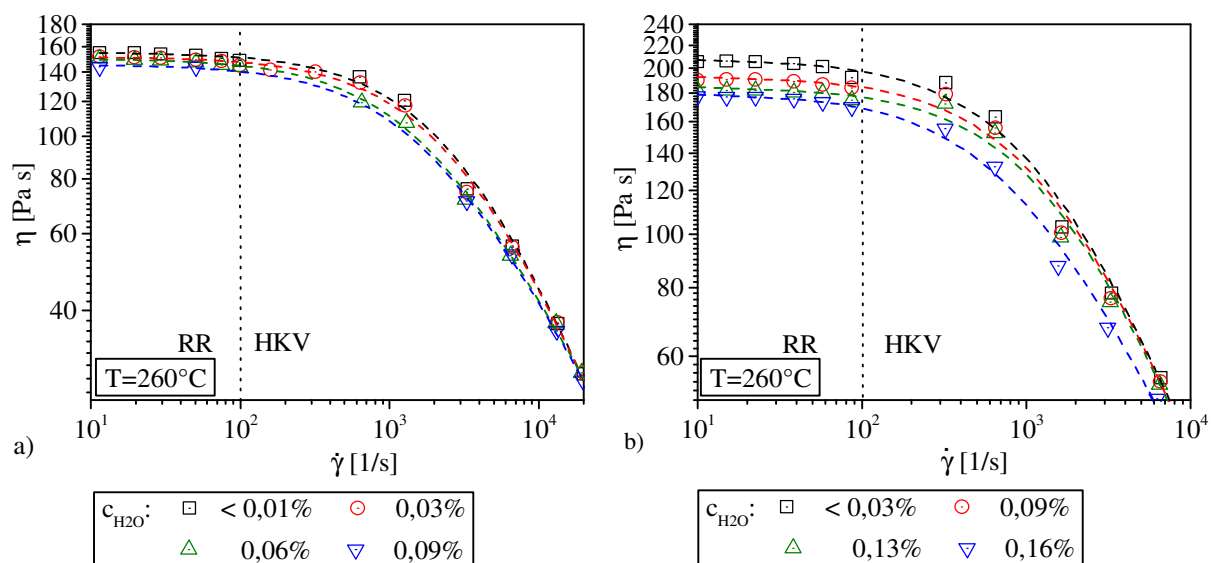


Abbildung 4-8 Einfluss der Materialkonditionierung auf die Viskosität bei  $260^\circ\text{C}$  von a) PBT und b) PA 6

Dieser Effekt ist nicht nur im geringen Schergeschwindigkeitsbereich festzustellen. Zur Vervollständigung der Fließkurve sind in Abbildung 4-8 Messdaten von Rotationsrheometer- und HKV-Untersuchungen als Fließkurve im relevanten Schergeschwindigkeitsbereich dargestellt. Zur Verdeutlichung der Kurvenverläufe und Messpunktzuordnung wurde jede Konditionierung über ein unabhängiges Fitting mit den Carreau-Ansatz dargestellt.

Entsprechend der Ergebnisse aus den niedrigen Schergeschwindigkeiten, wirkt sich die Materialkonditionierung auch in hohen Schergeschwindigkeitsbereichen mit steigender Restfeuchte reduzierend auf die Viskosität aus. Die Ausprägung dieses Effektes nimmt bei sehr hohen Schergeschwindigkeiten innerhalb der Messauflösung ab, eine Tendenz bleibt jedoch bestehen und bestätigt die beschriebenen physikalischen Einflüsse.

Die bisher betrachteten Polymere sind den teilkristallinen Polymeren zuzuordnen. Um den Einfluss von Restfeuchte auch bei unterhalb der Glasübergangstemperatur amorphen Kunststoffen zu untersuchen, wird ein amorphes Polycarbonat herangezogen. Durch die materialspezifisch höhere Viskosität kann bereits am HKV für die Materialkonditionierungsstufe mit der geringsten Restfeuchte das Nullviskositätsniveau erfasst werden. Auf Grund der nicht gültigen Cox/Merz-Relation wird in diesem Fall die Charakterisierung der Fließeigenschaften durch HKV-Untersuchungen fokussiert.

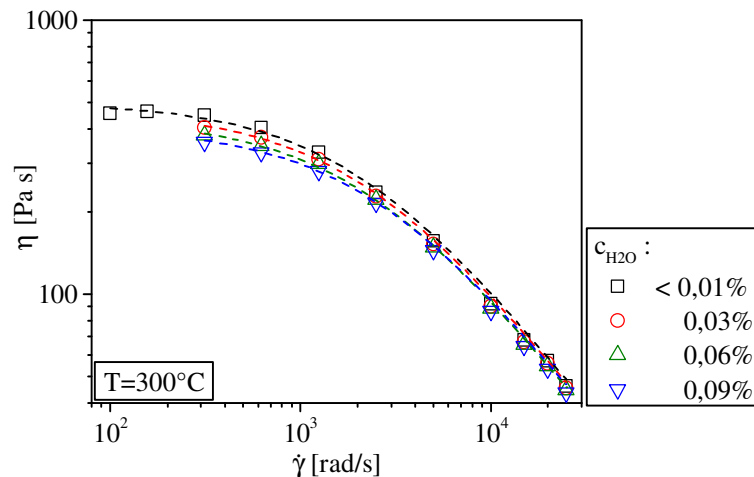


Abbildung 4-9 Einfluss der Materialkonditionierung auf die Viskosität bei 300 °C von PC

Auch für das amorphe Polycarbonat kann der viskositätsreduzierende Effekt mit steigendem Restfeuchteanteil bestätigt werden. Die Ausprägung und Einflussstärke ist materialspezifisch. Dies ist insbesondere im mittleren bis niedrigen Scherbereich festzustellen.

#### 4.4.2 Hydrolytisch verstärkte Degradation

Bei den untersuchten Polymeren kann es zu einer hydrolytisch verstärkten Degradation kommen. Insbesondere die untersuchten Polyester (PBT und PC) sind empfindlich gegenüber einer hydrolytischen Molekulargewichtsreduzierung, die das thermisch induzierte Degradationsverhalten verstärken kann. Auf Grund der Gleichgewichtsreaktion bei der Polykondensation kann die Anwesenheit von Wasser zu einer Reduzierung der Kettenlänge führen. Polyamide sind im Hinblick auf hydrolytische Effekte bei geringen Restfeuchteanteilen weniger anfällig als Polyester, können aber bei hohen Temperaturen ebenfalls durch diese Effekte beeinflusst werden [EP07].

Um eine mögliche hydrolytische Degradation darzustellen, ist auf der einen Seite eine gezielte Konditionierung und auf der anderen Seite eine identische Analyse im Hinblick auf die beschriebenen zeitabhängigen Degradationseffekte notwendig. Aus diesem Grund werden die konditionierten Probenkörper mit einem identischen Versuchsablauf im Rotationsrheometer untersucht. In Abbildung 4-10 ist die gemittelte Nullviskosität für die Konditionierungsstufen des PBT sowie des PA 6 und deren Entwicklung über der Messzeit dargestellt.



Der Einfluss der Konditionierung ist durch das reduzierte Nullviskositätsniveau beim Vergleich der Konditionierungsstufen zu erkennen. Das bereits diskutierte thermische Abbauverhalten kann auch in dieser Darstellung bestätigt werden. Im weiteren Verlauf sinkt bei allen Messreihen zu dem analysierten PBT kontinuierlich die Nullviskosität über der Zeit. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Reaktion, die zur Reduzierung der Polymerkettenlänge und darüber Reduzierung der Viskosität führt, zeitabhängig erst im Zeitschritt zu  $t_M = 900\text{s}$  beginnt. Dieses Verhalten wurde bereits in Kapitel 4.3.2 für das PBT dargestellt und bestätigt die Einordnung der Reaktionen. Das zeitabhängige Degradationsverhalten kann beispielsweise auf Additivierung zurückgeführt werden, wodurch in einer gewissen Zeitspanne chemische Reaktionen mit Einfluss auf die Kettenlänge unterdrückt werden. Anschließend findet bei allen Proben eine deutliche Viskositätsreduzierung über der Zeit statt. Allerdings verläuft die Degradation parallel verschoben mit nahezu identischen Abbauraten ab. Dies wird durch die lineare Approximation der Kurven verdeutlicht. Daher kann bei diesem Material innerhalb des betrachteten Zeitraumes davon ausgegangen werden, dass keine zusätzliche, hydrolytisch verstärkte Degradation auf die Polymerketten wirkt. Dies wäre durch eine deutlich erhöhte Abbaurate bei steigender Restfeuchte bedingt.

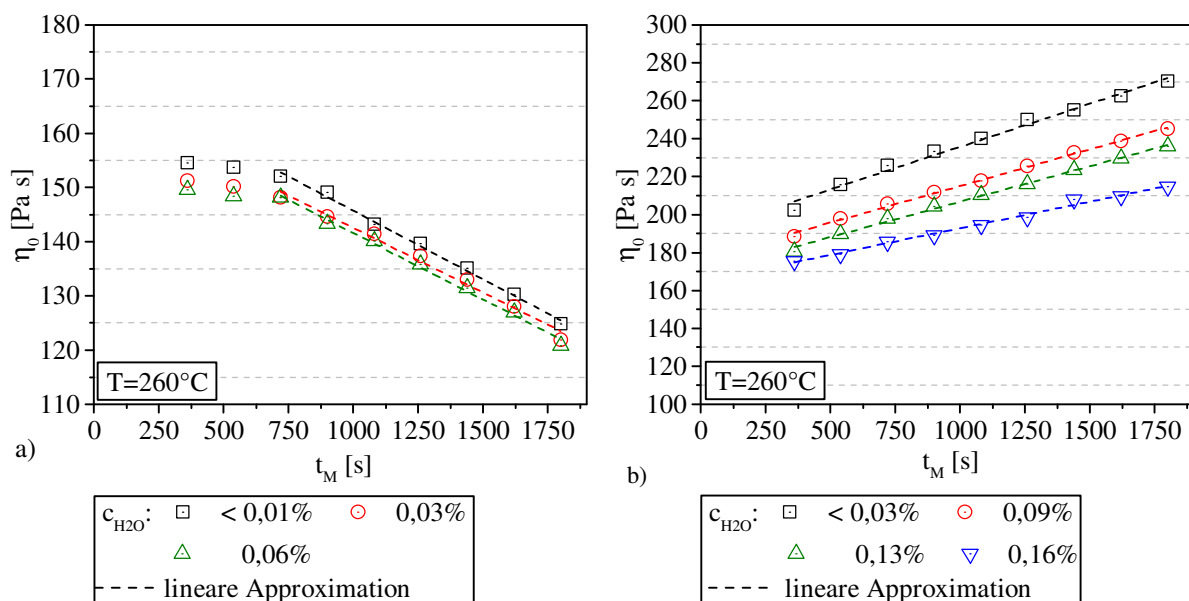


Abbildung 4-10 Einfluss der Zeit sowie Materialkonditionierung auf die komplexe Nullviskosität von a) PBT und b) PA 6 bei jeweils  $260^\circ\text{C}$

Bei der Betrachtung der analysierten PA 6 Proben ist ebenfalls eine Reduzierung des Nullviskositätsniveaus über der Restfeuchte erkennbar. Über der Zeit bedingt der bereits diskutierte Effekt der Nachkondensation den Anstieg der Nullviskosität. Auch in diesem Fall zeigt die lineare Approximation der Messdaten eine nahezu parallel verschobenen Aufbauraten, die einen signifikanten Einfluss chemisch hydrolytischer Effekte auf die Polymerkettenlänge ausschließt. Das untersuchte Polycarbonat zeigte ebenfalls unter erhöhtem Restfeuchteanteil keine chemischen Reaktionen auf die Polymerstruktur bei den untersuchten Konditionierungs-, Zeit- und Temperaturbereichen. Der Einfluss von Restfeuchte kann daher innerhalb des betrachteten Versuchsraumes und der Messauflösung als rein physikalischer Effekt betrachtet werden.

## 4.5 Darstellung von Chargeneinflüssen

Auf Chargeneinflüsse soll an dieser Stelle nur kurz eingegangen werden, da diese lediglich durch die Bandbreite der abgestimmten Rohstoffspezifikationen beeinflusst werden können. Ohne direkten Bezug zu einer industriellen Produktion sind hier nur Stichproben und Momentaufnahmen möglich. Trotzdem sind die Einflüsse auf die Produktqualität und Prozessführung durch Variationen in den rheologischen Eigenschaften bekannt und als kritisch zu bewerten. Innerhalb der durchgeführten Untersuchungen wurden Proben eines ABS aus einer laufenden Produktion über einen Zeitraum mit unterschiedlichen Chargenlieferungen betrachtet. Die kombinierten Viskositätsmessungen aus Rotationsrheometer und HKV sind in Abbildung 4-11 dargestellt. Die Cox/Merz-Relation kann für das untersuchte Material bestätigt und im Weiteren vorausgesetzt werden.

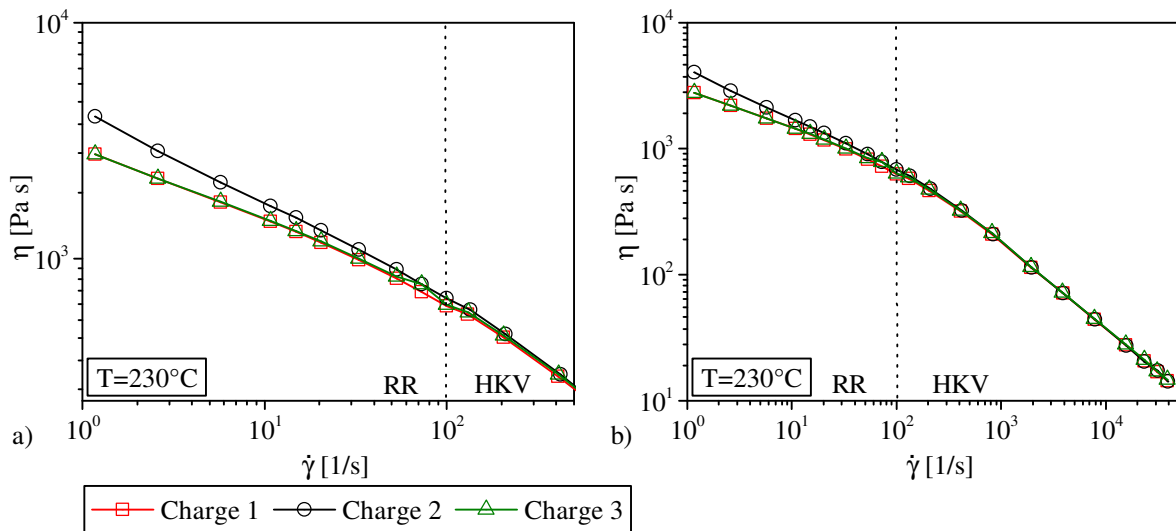


Abbildung 4-11 Einfluss von Chargenunterschieden auf die Viskosität von ABS bei 230 °C ( a) Schergeschwindigkeitsbereich 1- 500 s<sup>-1</sup> b) Schergeschwindigkeitsbereich 1-50000 s<sup>-1</sup>)

Die Viskositätskurven zeigen deutliche Unterschiede im Fließverhalten zwischen den einzelnen Chargen. Im Bereich hoher Schergeschwindigkeiten sind die Unterschiede auf Grund des geringeren Viskositätsniveaus kaum erkennbar, jedoch ab einer Schergeschwindigkeit von  $\dot{\gamma} = 500 \text{ s}^{-1}$  deutlich auszumachen. Die Unterschiede belaufen sich auf ein maximales  $\Delta\eta_{10} = 37,1\%$  in einem Bereich mit Schergeschwindigkeiten bis  $\dot{\gamma} = 10 \text{ s}^{-1}$ , im Bereich bis  $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$  belaufen sich die Unterschiede auf maximal  $\Delta\eta_{100} = 18,3\%$ , danach werden noch Unterschiede bis zu  $\Delta\eta_{612} = 6,7\%$  bei einer Schergeschwindigkeit von  $\dot{\gamma} = 612 \text{ s}^{-1}$  erfasst. Diese Momentaufnahme zeigt, dass durch Chargeneinflüsse mit deutlichen Viskositätsunterschieden zu rechnen ist. Eine Beeinflussung der Produktion ist allerdings über eine lange Übergangszeit durch Chargenwechsel zu sehen. Einflüsse durch Alterung sind im Vergleich zwar weiterhin schleichend aber durchaus für Variationen in kürzeren Zeiträumen relevant. Diese Variationen wirken sich zusätzlich zu dem durch die Charge jeweils vorgegebenen Viskositätsniveau auf den Prozess aus.

## 4.6 Modellbildung zur Beschreibung des Fließverhaltens

Ein Materialmodell bildet die materialspezifischen Eigenschaften und das Verhalten unter gegebenen Einflussfaktoren in mathematischen Funktionen ab. Die dargestellten Einflüsse auf die Materialeigenschaften zeigen im Hinblick auf die Viskosität eine klare Regelmäßigkeit. Um diese Einflüsse auf die Prozessführung übertragen zu können und resultierende Einflüsse auf Qualitätskriterien zu quantifizieren, ist eine Beschreibung über einen allgemeinen Modellansatz notwendig. Dazu werden die dargestellten Messdaten in mathematische Funktionen überführt, und eine Erweiterung des aktuellen Standes der materialbeschreibenden Modelle zur Integration von Konditionierungs- und Alterungseinflüssen vorgestellt. Eine vollständige Modellbildung zur Beschreibung des thermodynamischen und rheologischen Materialverhaltens wird für die Prozesssimulation in Kapitel 5 dargestellt.

Ein gängiger Modellansatz zur Beschreibung der Scherviskosität wurde mit dem Carreau-Ansatz bereits erläutert. Im Bereich der Alterungseffekte durch temperaturabhängige Zeiteinflüsse kann auf die Erweiterung des Carreau-Ansatzes nach *Mielicki* [Mi14] zurückgegriffen werden. Eine Übertragbarkeit auf das Kurzzeitverhalten der untersuchten Polymertypen ist zu überprüfen. Zur Beschreibung der Konditionierungseinflüsse wird im Folgenden der Carreau-Ansatz sukzessive erweitert, um die physikalisch bedingten Materialeigenschaftsänderungen abzubilden.

### 4.6.1 Zeitunabhängige Temperaturverschiebung

Vor einer Parametrierung der Modellansätze zur Beschreibung von chemischen Strukturänderungen, ist die zeitunabhängige Temperaturverschiebung materialspezifisch zu bestimmen. Auf die bereits dargestellten Ansätze nach Formel 2-5 und Formel 2-4 soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Die Überführung der Materialdaten in die spezifischen Modelle ist am Beispiel von PA 6 in Abbildung 4-12 als Fitting der Messdaten dargestellt. Die Darstellung verdeutlicht noch einmal die Gültigkeit der Cox/Merz-Relation auch innerhalb des erweiterten Temperaturspektrums.

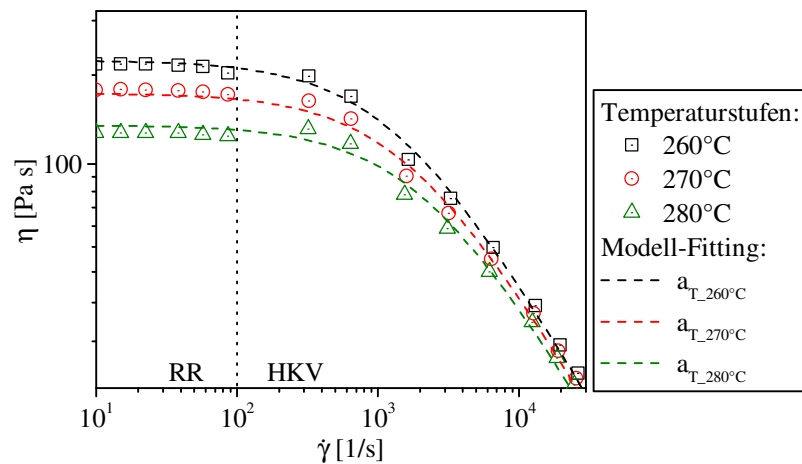


Abbildung 4-12 Modell zur Beschreibung des Temperatureinflusses auf die Viskosität am Beispiel von PA 6

Die Modellbeschreibung zur Parametrierung der zeitunabhängigen Temperaturverschiebung ist materialspezifisch analog für andere Materialien durchzuführen. Die Angaben zur Modellparametrierung für jedes Material sind dem Anhang zu entnehmen.

### 4.6.2 Modellbildung zur Beschreibung irreversibler chemischer Strukturänderungen

Zeitabhängige Alterungseffekte können nur bei den Untersuchungen am Rotationsrheometer dargestellt werden. Daher werden im Folgenden diese Ergebnisse für eine Modellbildung nach Formel 2-8 und Formel 2-9

herangezogen und durch die Messergebnisse am HKV für die initiale Alterungsstufe bei  $t_M = 360s$  bei den jeweiligen Temperaturstufen für eine vollständige Parametrierung ergänzt.

Die Darstellung von Nachkondensationseffekten über den erweiterten Modellansatz ist bereits aus der Literatur für das Langzeitverhalten von PA 12 bekannt. Am Beispiel des untersuchten PA 6 wird die Beschreibung von Kurzzeiteffekten über den Modellansatz überprüft. Zur Initialisierung der Modellparameter des Carreau-Ansatzes wird der Zustand bei  $T_0 = 260^\circ\text{C}$  und  $t_M = 360s$  herangezogen. Darauf aufbauend wird sowohl die Temperaturverschiebung nach *Arrhenius* als auch die Veränderung der Viskosität durch zeitbedingte Effekte bei der jeweiligen Temperaturstufe berücksichtigt. In Abbildung 4-13 sind die Ergebnisse zur Beschreibung des Alterungsverhaltens von PA 6 unter temperaturabhängigen Zeiteinflüssen dargestellt. Dabei wird der Faktor  $a_{SC}$  zur Beschreibung der chemischen Strukturänderung anhand der Rotationsrheometerdaten in Abbildung 4-13a nach Formel 2-8 parametriert und anschließend in die vollständige Beschreibung durch den erweiterten Carreau-Ansatz nach Formel 2-9 in Abbildung 4-13b integriert.

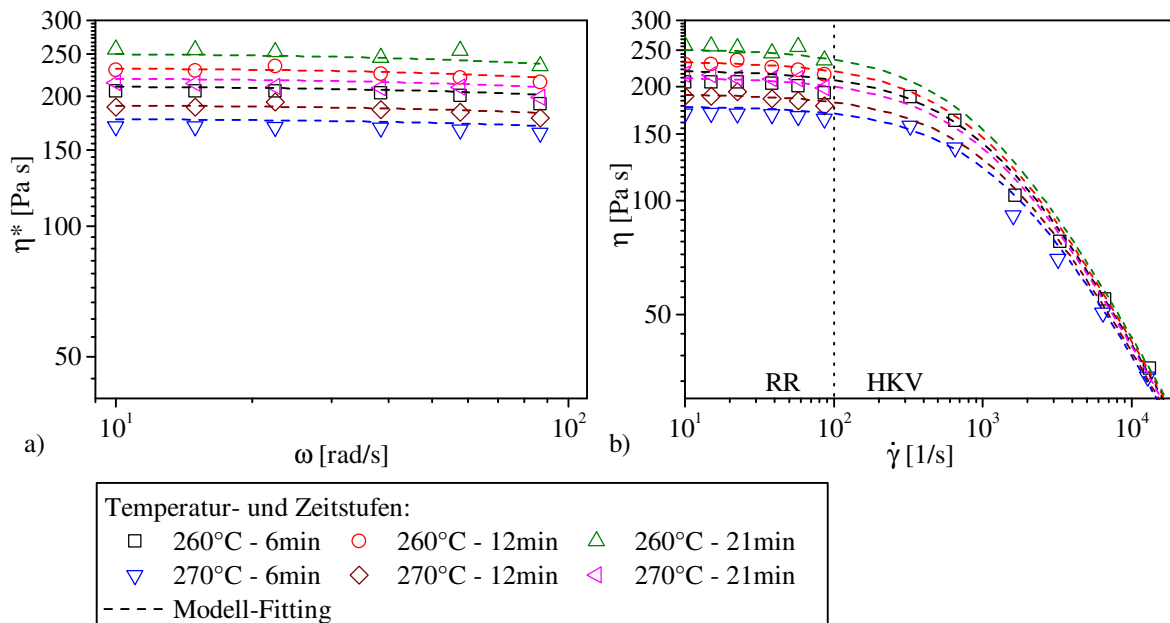


Abbildung 4-13 a) Modellbeschreibung im Nullviskositätsbereich zur Parametrierung des Strukturänderungsfaktors; b) Modellfitting zur Beschreibung von Einflüssen durch chemische Strukturänderungen auf die Viskosität am Beispiel von PA 6

Für die Beschreibung des Materialverhaltens von PA 6 innerhalb der untersuchten Einflussbandbreite ist das Modell geeignet. Es können sowohl die Reduzierung der Viskosität über der Temperatur als auch die zeitabhängige Nachkondensation und deren Verstärkung mit steigender Temperatur als Einfluss auf die Viskosität dargestellt werden. Die Modellgüte ist mit einem *Korrelationskoeffizient* von  $R^2 = 0,92$  signifikant zu den Einflussfaktoren und kann für eine Beschreibung der Phänomene im Weiteren genutzt werden.

Am Beispiel des untersuchten PBT wird die Anwendung des Modellansatzes für Degradationsreaktionen validiert. Die Modellparametrierung für Alterungseffekte bei PBT wird an dieser Stelle nicht weiter vertieft, da sie analog zu den dargestellten Ergebnissen bei der Modellbildung von Alterungseffekten von PA 6 durchzuführen ist. Zur Initialisierung der Modellparameter des Carreau-Ansatzes wird ebenfalls der Zustand bei  $T_0 = 260^\circ\text{C}$  und  $t_M = 360s$  herangezogen.

In Abbildung 4-14a ist Beschreibung der chemischen Strukturänderung im Bereich der Nullviskosität zur die Parametrierung des Strukturänderungsfaktors  $a_{SC}$  nach Formel 2-8 dargestellt. Des Weiteren zeigt die Abbildung 4-14b die Modellbeschreibung und das Fitting der Messdaten mit dem erweiterten Carreau-Modell nach Formel 2-9. Die Darstellungen zeigen, dass der Ansatz zur Beschreibung von temperaturabhängigen Degradationsreaktionen innerhalb des betrachteten Zeitintervalls geeignet ist. Es kann sowohl die Reduzierung der Vis-

kosität durch die Temperatur also auch die temperaturabhängige Verstärkung der zeitabhängigen Abbaureaktionen beschrieben werden. Die Genauigkeit der Abbildung der Messergebnisse und Alterungseffekte durch das Modell mit einem Korrelationskoeffizient von  $R^2 = 0,98$  ist sehr gut und kann für eine Beschreibung der Phänomene im Weiteren genutzt werden.

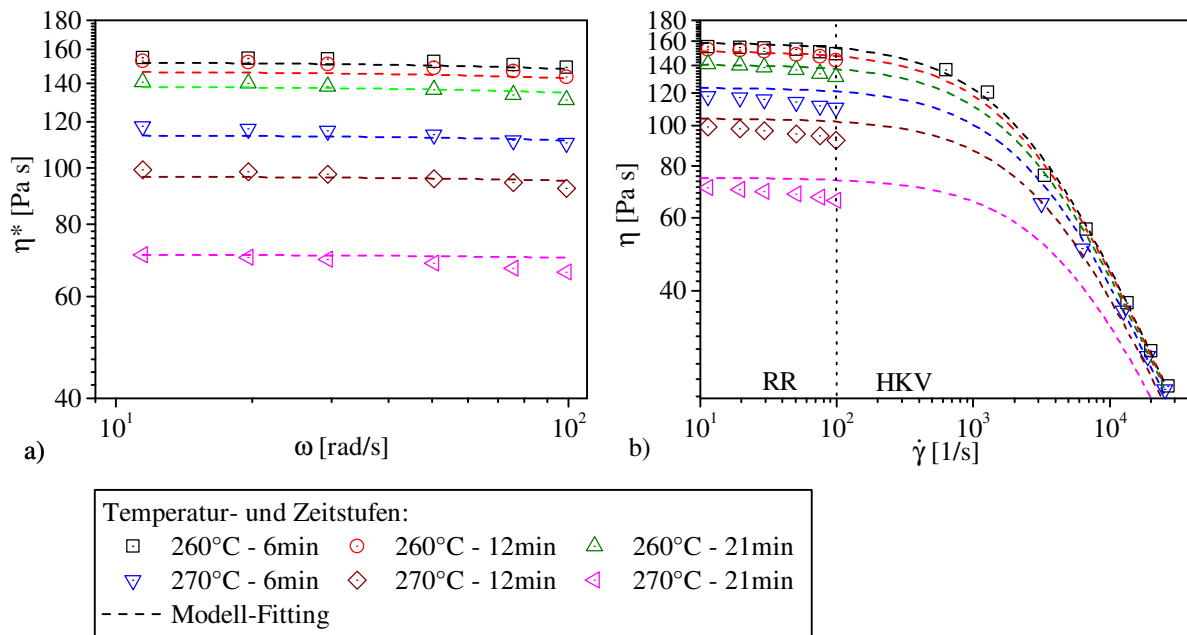


Abbildung 4-14 a) Modellbeschreibung im Nullviskositätsbereich zur Parametrierung des Strukturänderungsfaktors; b) Modellfitting zur Beschreibung von Einflüssen durch chemische Strukturänderungen auf die Viskosität am Beispiel von PBT

Es ist zu berücksichtigen, dass die Beschreibung der Alterungseffekte auf eine exponentielle Wachstumsfunktion zurückgeführt worden ist. Der dargestellte Zeitbereich und die Einflüsse auf die Viskosität sind hier zu Beginn im nahezu linearen Steigungsbereich der Funktion zu sehen, wie bereits durch Abbildung 4-10 für die Zeiteinflüsse bei verschiedenen Konditionierungsstufen angedeutet wurde. Die Parametrierung erlaubt dabei sowohl die Beschreibung von zeit- und temperaturabhängigen Viskositätsreduzierungen als auch von Viskositätszunahmen. Da sich die Grenzen der Messreihen an den relevanten Konditionierungs- und Alterungsstufen orientieren, kann für die Beschreibung von Prozesseinflüssen zwischen den Intervallgrenzen mit einer sehr guten Beschreibung des Materialverhaltens durch das Modell gerechnet werden. Der erweiterte Modellansatz kann im Weiteren für die Beschreibung von Einflüssen durch chemische Strukturänderungen auf die Viskosität verwendet werden. Eine prozessnahe Prognose des Materialverhaltens unter Berücksichtigung der dargestellten Einflussfaktoren ist möglich.

#### 4.6.3 Modellbildung zur Beschreibung reversibler Einflüsse auf die physikalische Struktur

Neben den Einflüssen einer chemischen Strukturänderung sind die Einflüsse der Materialkonditionierung von besonderer Prozessrelevanz. Bisher ist noch keine modellhafte Beschreibung der Einflüsse durch unterschiedliche Restfeuchtegehalte auf das Materialverhalten verfügbar. Um auch hier eine Prognose des Materialverhaltens zu ermöglichen, ist die Entwicklung eines neuen Modellansatzes notwendig.

In Anlehnung an den vorgestellten Erweiterungsansatz für chemische Strukturänderungen, wird auch für die physikalische Strukturänderung ein zusätzlicher Erweiterungsfaktor vorgeschlagen. Dabei werden die chemischen und physikalischen Effekte innerhalb des Versuchsraums getrennt voneinander betrachtet. Die chemische Strukturänderung wird über den Strukturänderungsfaktor  $a_{SC}$  beschrieben. In einem ersten Schritt wird daher der Erweiterungsfaktor für physikalische Strukturänderung  $a_{PC}$  (PC: **p**hysical **c**hange) eingeführt. Damit ergibt sich der Ansatz zur Erweiterung des Viskositätsmodells, abgeleitet aus Formel 2-4, zu Formel 4-2.

$$\eta(\dot{\gamma}, T, c_{H_2O}) = \frac{A \cdot a_T(T) \cdot a_{PC}(c_{H_2O})}{(1 + B \cdot a_T(T) \cdot a_{PC}(c_{H_2O}) \cdot \dot{\gamma})^c}$$

Formel 4-2 Carreau-Ansatz mit der Erweiterung zur Beschreibung von physikalischen Strukturänderungen durch Konditionierungseinflüsse über den physikalischen Strukturänderungsfaktor  $a_{PC}$

Zur Ermittlung der Charakteristik des physikalischen Strukturänderungsfaktors wird der vorgestellte Ansatz nach Formel 4-2 zur Abbildung der Messdaten aus Rotationsrheometer und HKV für unterschiedliche Konditionierungsstufen herangezogen. In Abbildung 4-15 sind die Messdaten und die Modellbeschreibung über den erweiterten Ansatz für die Konditionierungsstufen des PBT dargestellt. Dabei wird  $a_{PC}$  lediglich als Funktion des Restfeuchtegehalts hinterlegt.

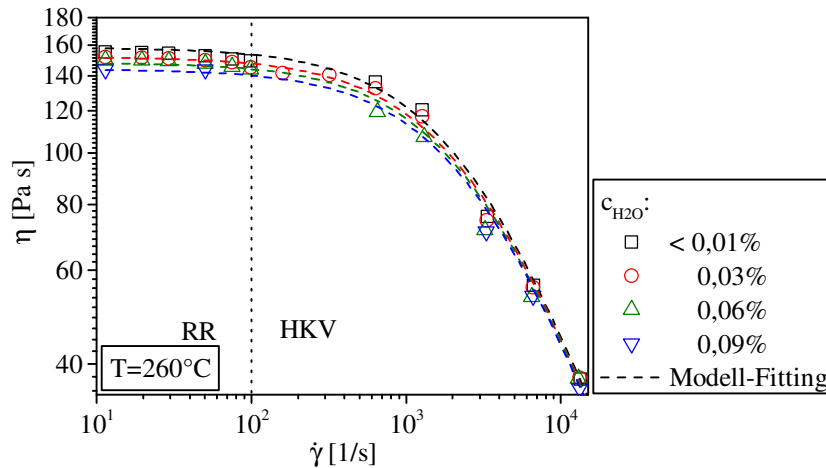


Abbildung 4-15 Modell-Fitting zur Beschreibung von Einflüssen durch physikalische Strukturänderungen auf die Viskosität am Beispiel von PBT

Aus der faktoriellen Beschreibung der Viskositätsänderung über dem Restfeuchtegehalt, kann die Charakteristik des physikalischen Strukturänderungsfaktors bestimmt werden. Der Verlauf des Faktors  $a_{PC}$  als Ordinate ist in Abbildung 4-16 in direkter Abhängigkeit über dem Restfeuchtegehalt als Abszisse aufgetragen. Die Einflüsse der Materialkonditionierung lassen innerhalb des Betrachtungsbereiches auf einen linearen Zusammenhang schließen, wobei der initiale Zustand des Materials bei  $T_0 = 260^\circ\text{C}$  und  $c_{H_2O} < 0,01\%$  mit  $a_{PC_0} = 1$  definiert ist. Bei diesem Zustand ist von keinem weiter zu differenzierenden Einfluss auf die Viskosität durch die Konditionierung auszugehen, daher wird dieser Ausgangszustand minimaler Restfeuchte zur Festlegung der initialen Viskositätskurve herangezogen.

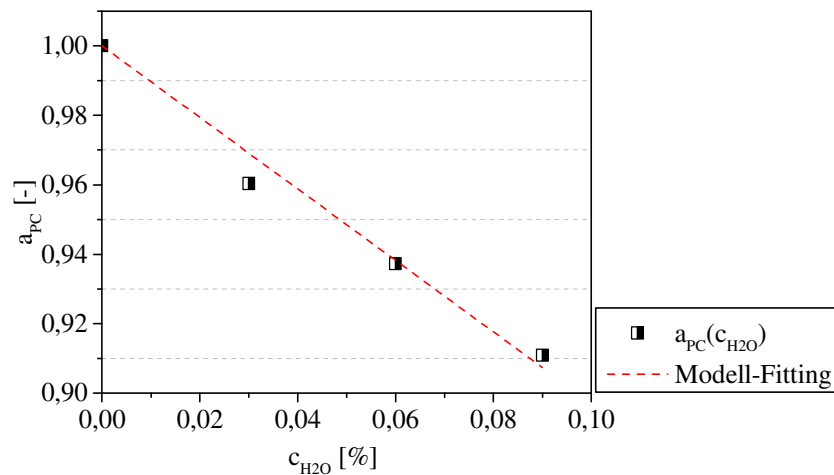


Abbildung 4-16 Der physikalische Strukturänderungsfaktor  $a_{PC}$  als Funktion des Restfeuchtegehalts Beispiel von PBT mit linearer Approximation zur Ableitung eines Modellansatzes

Für die Beschreibung des Faktors  $a_{PC}$  wird nach Formel 4-3 folgende lineare mathematische Formulierung herangezogen.

$$a_{PC}(c_{H_2O}) = 1 - a_{PC,IS} \cdot c_{H_2O}$$

Formel 4-3 Linearer Ansatz zur Beschreibung des physikalischen Strukturänderungsfaktors  $a_{PC}$

Dabei beschreibt  $c_{H_2O}$  die Materialkonditionierung über dem Restfeuchtegehalt. Die Konstante  $a_{PC,IS}$  stellt die materialspezifische Einflussstärke der physikalischen Strukturänderung dar. Diese ist für jedes Material und die entsprechend spezifische Einflussstärke zu bestimmen.

Zur Validierung des Modellansatzes wird dieser zur Beschreibung der physikalischen Strukturänderung durch Restfeuchteinflüsse bei PA 6 herangezogen. In Abbildung 4-17 sind die Messdaten sowie die Modellbeschreibung für die verschiedenen Konditionierungsstufen dargestellt. Dabei wird für die Bestimmung des physikalischen Strukturänderungsfaktors direkt die mathematische Abbildung nach Formel 4-3 in die Beschreibung der Fließkurve nach Formel 4-2 integriert.

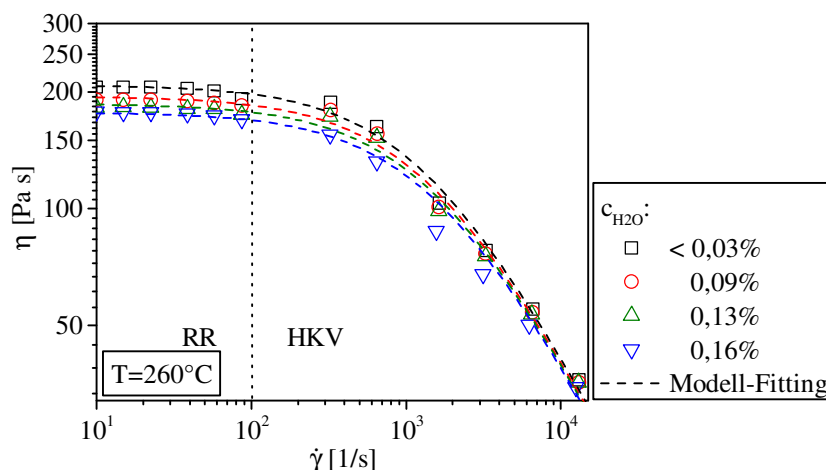


Abbildung 4-17 Modell-Fitting zur Beschreibung von Einflüssen durch physikalische Strukturänderungen auf die Viskosität am Beispiel von PA 6

In diesem Fall kann über einen Korrelationskoeffizient von  $R^2 = 0,99$  eine signifikante Beschreibung der Phänomene und exakte Abbildung der Messdaten durch das Modell erzielt werden. Über dem Schergeschwin-



digkeitsbereich ist eine sehr gute Übereinstimmung des Modells mit den erfassten Daten erkennbar. Der Haupteinfluss auf den Bereich der Nullviskosität und deren Verschiebung wird über die neu eingeführten Faktoren abgebildet, die zunehmend geringeren Unterschiede im hohen Schergeschwindigkeitsbereich können neben dem Übergangsverhalten ebenfalls dargestellt werden. Im Fall von PA 6 wird ein großer Variationsbereich für die verbleibende Restfeuchte, entsprechend des Verarbeitungsbereiches, durch das Modell abgebildet. Durch die umfassende Abbildung des Fließverhaltens im Nullviskositätsbereich, Übergangsverhalten und strukturoviskosen Bereich ist eine detaillierte Beschreibung durch den Modellansatz möglich. Der vorgestellte physikalische Strukturänderungsfaktor beschreibt den Einfluss der Konditionierung über den Restfeuchtegehalt in allen drei Bereichen mit sehr guter Abbildegenauigkeit. Hierdurch werden Prognosen zum Materialverhalten entsprechend der aktuellen Bedingungen ermöglicht, die sowohl innerhalb des Verarbeitungsbereiches als auch eine Überschreitung der Verarbeitungsrichtlinien betreffen. Eine Integration des chemischen und physikalischen Strukturänderungsfaktors in einem Modellansatz zur Beschreibung und Prognose des Fließverhaltens von Polymeren unter dem Einfluss von Temperatur, Zeit und Restfeuchtegehalt wird im abschließenden Kapitel 4.7 dargestellt.

Zur Validierung des Ansatzes zur Beschreibung des Einflusses der Materialkonditionierung auf das Fließverhalten amorpher Thermoplaste wird das Polycarbonat betrachtet. Die Modellbildung und die Parametrierung für Polycarbonat sind zu den bereits vorgestellten Polymeren identisch durchzuführen, daher soll an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden. In Abbildung 4-18 sind die HKV-Messdaten für die Konditionierungsstufen des PC dargestellt. Auf Grund des Übergangsbereiches bei hohen Scherraten im Vergleich zum PA 6 sowie PBT kann bereits über die am HKV erfassten Daten eine gute Abbildung der unterschiedlichen Bereiche der Fließkurve erzielt werden. Resultierend aus der im Vergleich hohen Viskosität können auch die Einflüsse durch den Restfeuchteanteil sehr differenziert über die Materialanalyse aufgelöst werden. Die erweiterte Modellbildung kann somit das Materialverhalten und die Einflüsse auf die Fließeigenschaften mit ausreichender Genauigkeit abbilden.

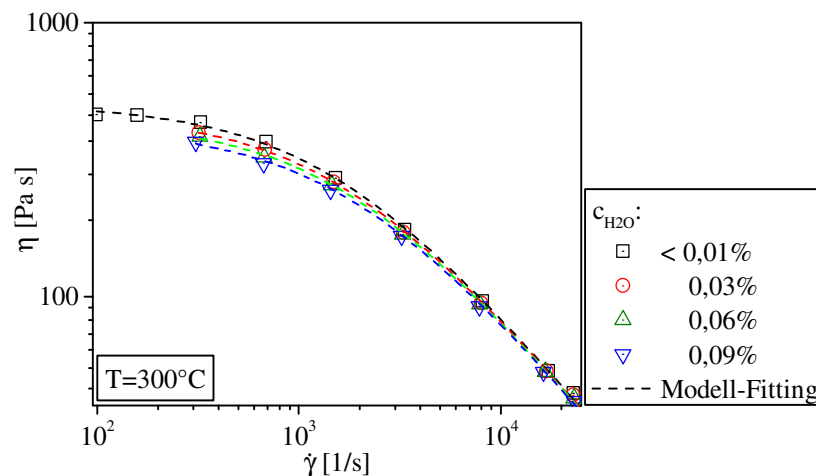


Abbildung 4-18 Modell-Fitting zur Beschreibung von Einflüssen durch physikalische Strukturänderungen auf die Viskosität am Beispiel von PC

Die Modellgüte zeigt mit einem Korrelationskoeffizient von  $R^2 = 0,99$  ebenfalls eine signifikante und exakte Abbildung der Messdaten und auftretenden Phänomene. Damit ist der vorgestellte Ansatz sowohl für die vorgestellten teilkristallinen Thermoplaste als auch für das amorphe Polycarbonat in seiner Anwendung zur Prognose des Fließverhaltens gültig. Die Modellparameter und materialspezifische Parametrierung sind im Anhang in Kapitel 10 zusammenfassend dargestellt.



#### 4.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits innerhalb der prozessrelevanten Zeit- und Temperaturbereiche mit einer materialspezifischen Veränderung der chemischen Struktur von technischen Polymeren gerechnet werden muss. Ein Effekt, der bei der Interpretation der erfassten Daten zu berücksichtigen ist, ist die kontinuierliche Belastungskombination aus Scherung und Temperaturhaltebereichen während der Charakterisierung. Hierdurch werden die beschriebenen Alterungseffekte gegebenenfalls im Vergleich zu der kurzen Scherzeit bei der Plastifizierung und eventuellen Haltezeiten im Anschluss verstärkt. Auf Grund der niedrigen Scherraten bei der Messung im Rotationsrheometer ist dieser Effekt allerdings als sehr gering einzuschätzen.

Die untersuchten Materialien PA 6 und PBT haben eine *maximale Verweilzeit* von  $t_V = 600s$  in der Plastifiziereinheit als Referenz des Herstellers vorgegeben. Wird diese Vorgabe nebst der *angegebenen Verarbeitungstemperatur* von  $T_V = 260^\circ C$  beispielsweise für das untersuchte PBT herangezogen, so kann von einem in diesem Verarbeitungsfenster stabilen Polymer ausgegangen werden. Werden die Zeitvorgaben durch Maschinenstillstände überschritten oder an den Grenzen der Temperaturvorgaben Prozesseinstellungen gewählt, so können bereits kurze Verweilzeitvariationen starke Auswirkungen auf die resultierenden Materialeigenschaften haben. Die Bandbreite der Eigenschaftsvariationen ist in Tabelle 4-1 bezogen auf den Ausgangszustand nach der Homogenisierung bei  $t_M = 360s$  zusammengefasst. Alleine durch die zeitlich bedingten Effekte können leichte Überschreitungen der Herstellervorgaben bereits zu einer deutlichen Veränderung der Nullviskosität und hierüber zu Einflüssen auf die Prozess- und Produktqualität führen.

Tabelle 4-1 Bandbreite der Eigenschaftsvariationen durch temperaturabhängige Zeiteinflüsse

$t_M [s]$	PBT		PA 6	
	$\Delta\eta_0 [\%]$		$\Delta\eta_0 [\%]$	
	$260^\circ C$	$270^\circ C$	$260^\circ C$	$280^\circ C$
360	-	-	-	-
540	-0,50	-8,77	6,82	5,25
720	-1,59	-18,15	11,82	11,58
900	-3,57	-26,63	16,77	17,57
1080	-7,37	-34,40	20,62	24,33
1260	-9,67	-41,59	25,04	31,00

Das untersuchte Polycarbonat zeigt, dass die zeit- und temperaturabhängigen Effekte materialspezifisch sind. Bei diesem Material ist innerhalb des untersuchten Zeit- und Temperaturbereiches nicht mit einer Strukturänderung über chemische Reaktionen zu rechnen. Abgesehen von Homogenisierungseffekten ist das Material thermisch stabil. Grundsätzlich ist zu beachten, dass alle untersuchten Materialien einer Additivierung unterliegen und in der Regel keine Reinpolymere sind. Hierdurch werden gezielt Eigenschaften, wie eine thermische Beständigkeit, Fließfähigkeit aber auch Kristallisationsverhalten, gezielt unterstützt. Dies unterstreicht die materialspezifischen Eigenschaften sowie unterschiedliche Reaktionen auf Zeit-, Temperatur- und Schereinflüsse. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass nicht grundsätzlich von thermisch stabilen Materialien ausgegangen werden kann, die Ausprägung und Richtung der Eigenschaftsänderungen aber materialspezifisch einzuschätzen ist. Die Einhaltung der Verarbeitungshinweise reduziert die Einflussbandbreite auf die Viskosität und die Variation der Materialeigenschaften.

Zusätzlicher wirken sich die Einflüsse durch eine physikalische Strukturänderung resultierend aus der Materialkonditionierung über den Restfeuchteanteil auf die Werkstoffeigenschaften aus. Durch variierende Restfeuchteanteile ist mit einer Reduzierung der Viskosität mit steigendem Restfeuchteanteil zu rechnen. Auch hier sind Einflüsse mit einer Viskositätsdifferenz von bis zu  $\Delta\eta_0 = 7,73\%$  im Grenzbereich zu den Verarbeitungsrichtlinien möglich. Je höher die Überschreitung der Verarbeitungsrichtlinien ist, desto größer ist auch der Einfluss auf die Viskosität. Aus dem physikalischen Strukturänderungsfaktor ergibt sich die in Tabelle 4-2 zusammengefasste Variationsbandbreite.

Tabelle 4-2 Bandbreite der Eigenschaftsvariationen durch physikalische Einflüsse der Materialkonditionierung

	<i>PBT</i>	<i>PA 6</i>	<i>PC</i>
$c_{H_2O}$ [%]	$\Delta\eta_0$ [%]	$\Delta\eta_0$ [%]	$\Delta\eta_0$ [%]
$< 0,01$	-	-	-
$0,03$	-3,06	-1,12	-7,73
$0,06$	-6,27	-	-12,21
$0,09$	-8,81	-7,70	-17,60
$0,13$	-	-11,27	-
$0,16$	-	-15,95	-

Bei einer Überschreitung der Verarbeitungshinweise sind deutliche Veränderungen in der Viskosität zu erwarten. Insbesondere bei Polymeren mit einer hohen Toleranzgrenze sind bereits innerhalb der Verarbeitungshinweise deutliche Unterschiede in den Fließeigenschaften die Folge von Schwankungen in der Materialkonditionierung.

Eine Beschreibung der Alterungseinflüsse auf die Prozessführung wird durch die Simulation des Spritzgießprozesses ermöglicht. Hierzu bietet der neu vorgestellte erweiterte Carreau-Ansatz unter Berücksichtigung der genannten Einflussfaktoren die notwendig modellhafte Beschreibung der Materialeigenschaften. Eine Prognose des Materialverhaltens unter den gegebenen Einflussfaktoren ist prozessnah und signifikant möglich. Zusammenfassend wird die vollständige Beschreibung des rheologischen Materialverhaltens unter Berücksichtigung von zeit-, temperatur- und konditionierungsbedingten Effekten durch die Erweiterung des Carreau-Ansatzes zu Formel 4-4 dargestellt.

$$\eta(\dot{\gamma}, t, T, c_{H_2O}) = \frac{A \cdot a_T(T) \cdot a_{SC}(t, T) \cdot a_{PC}(c_{H_2O})}{(1 + B \cdot a_T(T) \cdot a_{SC}(t, T) \cdot a_{PC}(c_{H_2O}) \cdot \dot{\gamma})^C}$$

Formel 4-4 Carreau-Ansatz zur materialspezifischen Beschreibung der Viskosität unter Berücksichtigung von chemischen und physikalischen Strukturänderungen

Dieser Modellansatz ermöglicht eine präzise Prognose des Materialverhaltens unter den jeweilig spezifischen Bedingungen und Einflusskombinationen. Damit können prozessrelevante Einflüsse durch die Materialkonditionierung sowie Verweilzeiten unter hohen Temperaturen auf den Prozess beschrieben werden. Im Hinblick auf Chargenschwankungen sind diese innerhalb des Modells durch eine neue Parametrierung der Hauptfaktoren zu integrieren. Werden die dargestellten Einflüsse und die Einflussstärke in Bezug auf Konditionierung und Alterung mit denen von Chargenschwankungen verglichen, so kann von einer ähnlichen Beeinflussung des Prozesses ausgegangen werden. Innerhalb von Produktionen werden sich allerdings die beschriebenen Einflüsse überlagern und somit muss mit deutlichen Schwankungen der Viskosität gerechnet werden. Im Weiteren werden die Einflüsse durch Konditionierung, temperaturabhängige Zeiteinflüsse sowie Chargenschwankungen allgemein als Beispiele für Viskositätsvariationen im Spritzgießprozess diskutiert.

## 5 Darstellung von Alterungseinflüssen in der Spritzgießsimulation

Zur Übertragung der dargestellten Einflüsse auf das Materialverhalten auf den Spritzgießprozess und auf qualitätsbestimmende Prozessparameter, ist die Integration des materialbeschreibenden Modells in die Prozesssimulation notwendig. Auf diese Weise kann eine Prognose zu Prozessschwankungen und Qualitätseinflüssen sowie zum Kompensationspotential dargestellt werden. Die Simulation bietet die Möglichkeit, eine qualitative Abbildung des Prozesses und der Störgrößen zu generieren. Dabei können detaillierte Daten, die in einem Spritzgießprozess nicht erfasst werden können, über die Software berechnet werden. Beispiele hierfür sind eine detaillierte Massetemperaturentwicklung und Druckverteilung im Werkzeug sowie eine Darstellung der Volumen- und Masseströme.

Durch das Prozessmodell werden die relevanten Parametereinstellungen des Spritzgießprozesses für die Simulationsumgebung vorgegeben und durch entsprechende Materialmodelle zur Abbildung der Prozessführung ergänzt. Auf den Aufbau der Software und das verwendete Prozessmodell zur Abbildung des Spritzgießprozesses in der Simulation soll nicht vertiefend eingegangen werden. Die Materialmodelle können mit einer entsprechenden Detaillierung zur Integration der beschriebenen Alterungseffekte angepasst werden, wobei die in der Simulation vorgegebenen Randbedingungen und Vereinfachungen beachtet werden müssen. Beispiele hierfür sind die nicht berücksichtigte elastische Komprimierung der Schmelze in der Füllphase. Aus diesem Grund können die Effekte nur qualitativ beschrieben werden, aber nicht direkt auf die Messgrößen im Prozess übertragen werden. Die quantitativen Abweichungen liegen bei aktuellen Berechnungstools bei ca. 10 % [Dö12].

Innerhalb der Diskussion wird ein Fokus auf den geschwindigkeits- oder volumenstromgeregelten Einspritzvorgang gelegt. Die qualitätsrelevanten Einflüsse über die Prozessführung und Materialeigenschaften insbesondere in dieser Zyklusphase sind anhand von Prozesskennzahlen darzustellen. Innerhalb der Spritzgießproduktion ist es nur bedingt möglich Daten zu Druck- und Temperaturverläufen im Werkzeug aus dieser Phase zu erfassen. Daher ist hier die Anwendung der Simulation zielführend. Ein Abgleich mit dem realen Prozess ist notwendig, um anschließend qualitätsrelevante Prozesskennzahlen in die Entwicklung einer neuartigen Prozessregelung zu integrieren. Die Übertragbarkeit der Prozesskennzahlen auf spezifische Qualitätskriterien muss gegeben sein. Bekannte Einflüsse auf die Nachdruckphase, den Werkzeuginnendruck und damit das Bauteilgewicht durch Viskositätsschwankungen werden in der Simulation zur Validierung der Fähigkeit des materialbeschreibenden Modells, prozessnahe Einflüsse darzustellen, herangezogen. Auf Grund der hohen Aussagefähigkeit über die aktuelle Prozesssituation werden im Folgenden bei der Darstellung der Simulationsergebnisse, Prozesscharakterisierung und Validierung der Prozessregelung auch signifikante Prozesswerte unter dem Begriff Prozesskennzahl zusammengefasst.

### 5.1 Aufbereitung der Materialdaten und Definition der Randbedingungen

Die bereits dargestellten rheologischen Materialdaten und das Verhalten unter entsprechenden Einflussbedingungen können in der Simulation durch die beschriebenen Modellansätze integriert werden. Die nach dem Stand der Technik verwendeten Modelle greifen auf den Arrhenius-Ansatz, die WLF-Gleichung und das Carreau-Modell zurück. Durch die Hinterlegung von drei temperaturspezifischen Materialdatensätzen wird eine ausreichende Genauigkeit bei der Abbildung des Temperaturverschiebungsfaktors erreicht. Hinzu kommen die vorab festzulegenden Einflüsse durch Alterungsbedingungen und Konditionierung. Um das Materialverhalten unter den gegebenen Prozessbedingungen in der Spritzgießsimulation möglichst detailliert beschreiben zu können, wird zusätzlich zu den rheologischen Materialdaten das thermodynamische Werkstoffverhalten hinterlegt.

Die erfassten thermodynamischen Eigenschaften werden materialspezifisch hinterlegt. Zur Beschreibung der Fließeigenschaften in Kombination mit dem thermodynamischen Werkstoffverhalten wird eine *materialspezifische No-Flow-Temperature*  $T_{NF}$  definiert, wodurch die Grenze der Fließfähigkeit der Materialien in der Si-

mulationsumgebung festgelegt wird. Bei teilkristallinen Polymeren wird die druckabhängige Kristallisationstemperatur herangezogen, bei amorphen Thermoplasten die Glasübergangstemperatur. Diese Daten werden aus dem  $p_vT$ -Verhalten abgeleitet, welches im Weiteren detailliert beschrieben wird.

### 5.1.1 Thermodynamisches Werkstoffverhalten

Die Darstellung der Daten hinsichtlich der Korrelation zwischen Massedruck, spezifischem Volumen und Temperaturniveau wird durch das  $p_vT$ -Diagramm erzielt. Die Daten wurden bei den jeweiligen Temperaturen in isobarer Messvorschrift aufgenommen. Im Hinblick auf die Prozesssimulation sind Messdaten aus dem Abkühlverhalten für die Beschreibung des  $p_vT$ -Verhaltens zu verwenden.

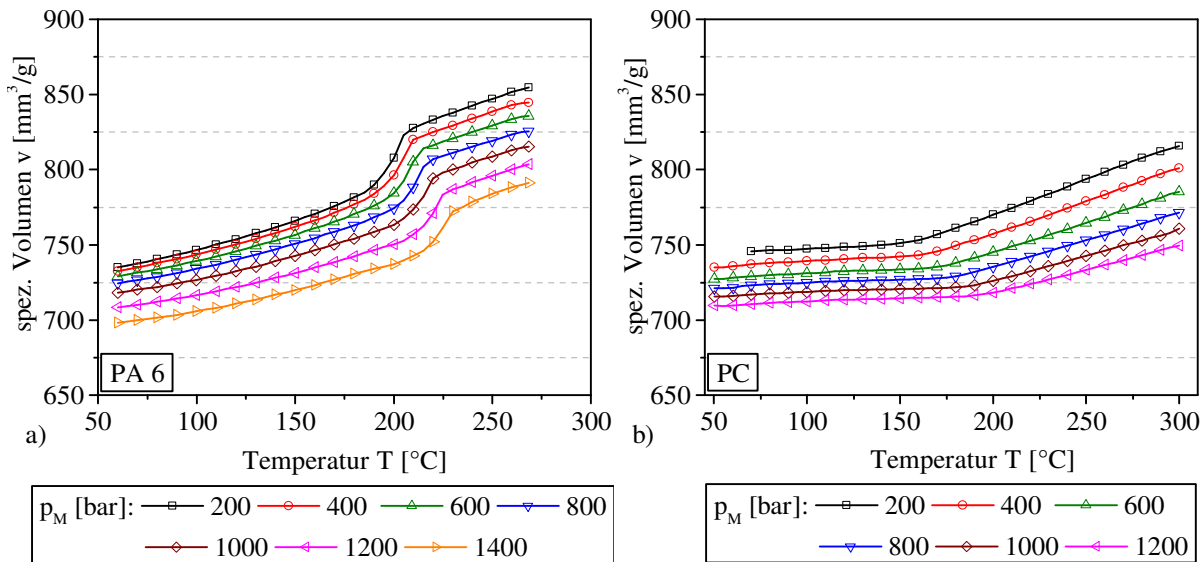


Abbildung 5-1 Isobar erfasste  $p_vT$ -Daten bei einer Abkühlrate von 2,5 K/min am Beispiel von a) PA 6 und b) PC

In Abbildung 5-1 sind beispielhaft für PA 6 als teilkristalliner Thermoplast und PC als amorpher Thermoplast die isobar aufgenommenen  $p_vT$ -Kurven dargestellt. Dabei sind die Messkurven mit reduzierter Messpunkanzahl für eine bessere Übersicht dargestellt. Die temperaturabhängige Korrelation des spezifischen Werkstoffvolumens in Abhängigkeit vom anliegenden Druckniveau kann als Messdatensatz hinterlegt und ähnlich zur Rheologie über mathematische Ansätze beschrieben werden. Gängige Modelle für diese Abbildung sind das 2-Domain-Modified-Tait-Modell sowie der Koeffizientenansatz nach Schmidt [LR+01, Ro93, Sc86, Wu05]. Eine Extrapolation aus der Modellbeschreibung bis zu einem Massedruckniveau von  $p_M = 1\text{bar}$  ist möglich. Dabei ist die geringe Abkühlgeschwindigkeit von  $\dot{T} = 2,5\text{K/min}$  des Messgerätes zu beachten. Da im Spritzgießprozess deutlich höhere Abkühlgeschwindigkeiten auftreten, ist eine Adaption der  $p_vT$ -Daten hin zu höheren Abkühlgeschwindigkeiten notwendig.

Das Verhalten in Bezug auf die Kristallisation und die Glasübergangstemperatur bei höheren Abkühlgeschwindigkeiten kann, neben der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ , über eine DSC-Analyse erfasst werden. Die Funktion der spezifischen Wärmekapazität wird über eine definierte Anzahl an Stützstellen als Funktion  $c_p(T)$  diskretisiert. In den Messwertverläufen in Abbildung 5-2 zu  $c_p$  bei verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Peak-Temperatur  $T_{pc}$  sowie des extrapolierten Off- und Endsets der Kristallisation. Bei amorphen Thermoplasten ist, dargestellt am Beispiel eines Polycarbonats, eine Verschiebung der Glasübergangstemperatur zu beobachten.

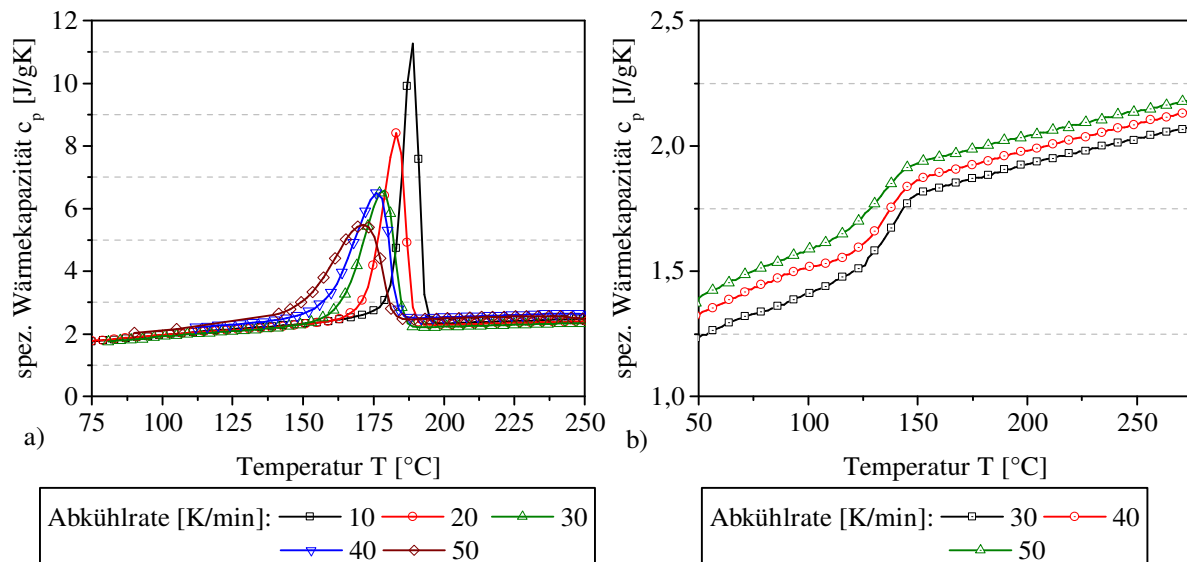


Abbildung 5-2 Verlauf der spezifischen Wärmekapazität bei verschiedenen Abkühlraten am Beispiel von a) PA 6 und b) PC

Bereits bei Dörner [Dö12] wurden die  $pvT$ -Daten anhand der DSC-Analyse hin zu höheren Abkühlgeschwindigkeiten adaptiert. Unter der Annahme, dass die Peaktemperatur und die Onset-Temperatur für geringe Abkühlraten nahezu identisch sind, kann eine Anpassung der effektiven Kristallisationstemperatur  $T_{eK}$  im  $pvT$ -Diagramm bei  $p_M = 1\text{ bar}$  auf die in der DSC erfasste Peak-Temperatur  $T_{pc}$  bei maximaler Abkühlrate erfolgen. Da dieses Vorgehen die Erweiterung des Temperaturbereiches, in dem die Kristallisation stattfindet, bei steigender Abkühlrate nicht berücksichtigt, wird eine angepasste Vorgehensweise angewendet.

In die Modifikation des  $pvT$ -Diagramms wird, neben der Peak-Temperatur, zusätzlich noch die Breite des Temperaturbereiches durch die extrapolierte On- und Offset-Temperatur ( $T_{efc}$  und  $T_{eic}$ ) berücksichtigt. Hierzu ist im Vorfeld eine Diskretisierung der Messdaten über das Modified-Tait-Modell notwendig, um eine Extrapolation der 1 bar-Linie sowie eine Beschreibung der charakteristischen Bereiche des Kurvenverlaufs aus den Messdaten zu ermöglichen.

Aus der Modellierung können die in der festen sowie flüssigen Phase vorliegenden charakteristischen linearen Kurvenverläufe des  $pvT$ -Verhaltens abgeleitet werden. Entsprechend der Vorschrift durch die jeweilige Gradengleichung wird der Endpunkt der Grade im festen Bereich auf die in der DSC-Analyse ermittelte Temperatur  $T_{efc}$  festgesetzt sowie der Startpunkt des linearen Bereiches in der flüssigen Phase auf die Temperatur  $T_{eic}$  übertragen. Auf diese Weise wird der Temperaturbereich, in dem eine Kristallisation stattfindet, an die vorliegende Abkühlgeschwindigkeit angepasst. Die ermittelte Peaktemperatur  $T_{pc}$  wird als Temperatur maximaler Kristallisationsgeschwindigkeit in das Übergangsverhalten im  $pvT$ -Diagramm übertragen.

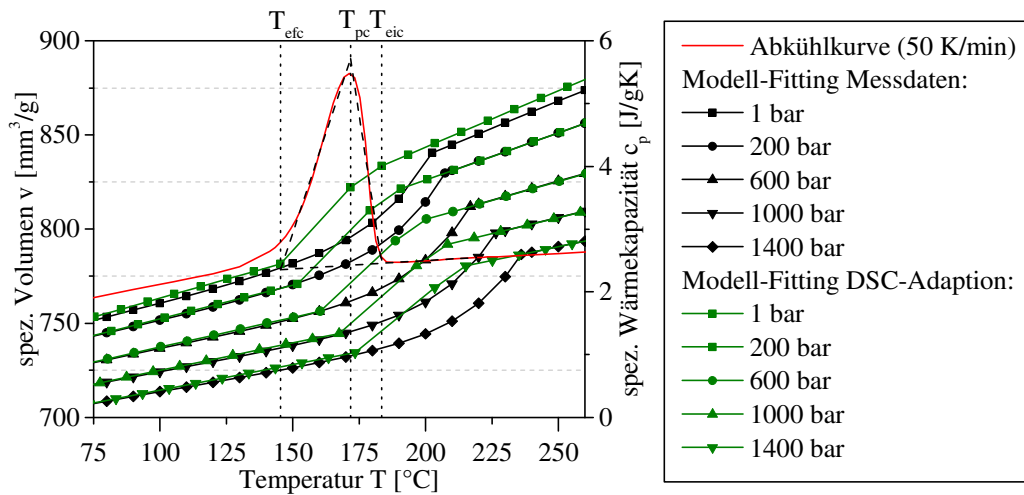


Abbildung 5-3 Anpassung des  $pvT$ -Verhaltens an höhere Abkühlgeschwindigkeiten entsprechend der DSC-Analyse für teilkristalline Polymere am Beispiel von PA 6

Auf Grund der Abhängigkeit der einzelnen Parameter innerhalb des Tait-Modells ist eine Adaption der Modellparameter an die Messwerte nicht direkt möglich. So kann die *Übergangstemperatur*  $T_t$  nicht mit der Peak-Temperatur  $T_{pc}$  gleichgesetzt werden, ohne die Modellparameter zur Beschreibung der linearen Bereiche zu beeinflussen. Daher ist eine erneute Diskretisierung der angepassten Datensätze mit dem Modified-Tait-Modell notwendig.

Die Modifikation wird für die diskutierten Materialien anhand der jeweils maximal erreichbaren Abkühlgeschwindigkeit in der DSC-Analyse durchgeführt. Bei den amorphen Thermoplasten wird eine Anpassung der Glasübergangstemperatur angewandt und in den Materialdaten der Simulationsumgebung hinterlegt. Die Anpassung der  $pvT$ -Daten an höhere Abkühlgeschwindigkeiten für amorphe Thermoplaste ist in Abbildung 5-4 schematisch dargestellt. Für eine detaillierte Darstellung der Zusammenhänge zwischen der Abkühlgeschwindigkeit und dem  $pvT$ -Verhalten amorpher Thermoplaste sowie Ansätze zur Integration dieses Verhaltens in beschreibende Modelle soll auf [Ba85, CCS96, DS+08] verwiesen werden. Des Weiteren wird die Wärmeleitfähigkeit unter Druck und Temperatureinfluss hinterlegt und analog zur spezifischen Wärmekapazität modellbasiert abgebildet.

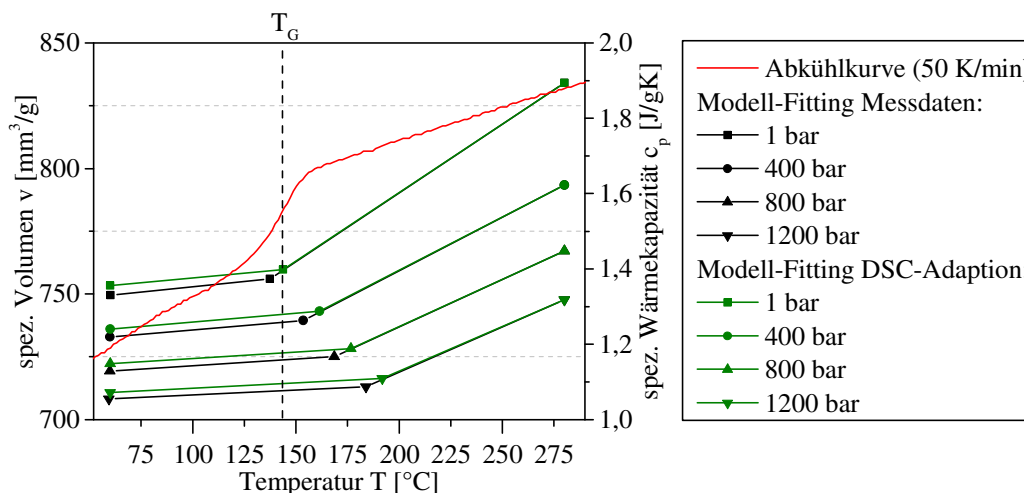


Abbildung 5-4 Anpassung des  $pvT$ -Verhaltens an höhere Abkühlgeschwindigkeiten entsprechend der DSC-Analyse für amorphe Polymere am Beispiel von PC

### 5.1.2 Messgrößen, Prozessparameter und Randbedingungen der Simulation

In einem ersten Schritt werden, angelehnt an die aktuelle Prozessführung, Anlagenspezifikationen der Laboranlage, Verarbeitungshinweise und notwendige werkzeugspezifische Anforderungen sowie Prozessparameter festgelegt. Von diesem Referenzprozess werden die Einflüsse und Auswirkungen variierender Materialeigenschaften auf den Prozess und qualitätsrelevante Parameter dargestellt. Insbesondere wird hier die Schnecken-vorschubgeschwindigkeit, respektive der Einspritzvolumenstrom und die resultierenden Massedruck- und Temperaturverläufe sowie Scherbedingungen betrachtet. Außerdem wird eine Betrachtung der Umschaltkriterien durchgeführt. Eine direkte Simulation von der Ausprägung von Qualitätskriterien, wie Oberflächeneigenschaften, ist nicht möglich. Daher werden diese Kriterien erst bei der Diskussion der Prozessregelung mit in die Betrachtungen einfließen. Mit Bezug zu qualitätsrelevanten Parametern werden die Ergebnisse der Simulation auf Messgrößen an der Spritzgießanlage referenziert. Eine qualitative Betrachtung von den bereits aus der Prozesscharakterisierung von *Schiffers* [Sc09] bekannten Bauteilgewichtsunterschieden durch Viskositätschwankungen wird in der Simulation abgebildet.

Innerhalb der Simulationssoftware kann die Kavität sowie das Werkzeug mit der Geometrie der Kühlkanäle direkt im Preprocessor konstruiert werden. Die verwendete Werkzeugkavität entspricht einem Bauteil bestehend aus zwei dünnwandigen, quadratischen Platten mit den Abmessungen 60 x 60 x 2 mm. An der Unterseite des Bauteils sind zwei Staubalken vorgesehen, die den Anguss von den Platten trennen und eine gleichmäßige Füllung begünstigen. Der Anguss ist als Kaltkanal ausgeführt. Das Bauteil erreicht ein Gesamtvolumen von  $V = 20,0925 \text{ cm}^3$  und ist die virtuelle Abbildung des in den Spritzgießversuchen verwendeten Werkzeugs. Das Bauteil aus dem die Kavität abgeleitet wird, ist in Abbildung 5-5 mit den entsprechenden Abmaßen und der Lage des Werkzeuginnendruckensors dargestellt.

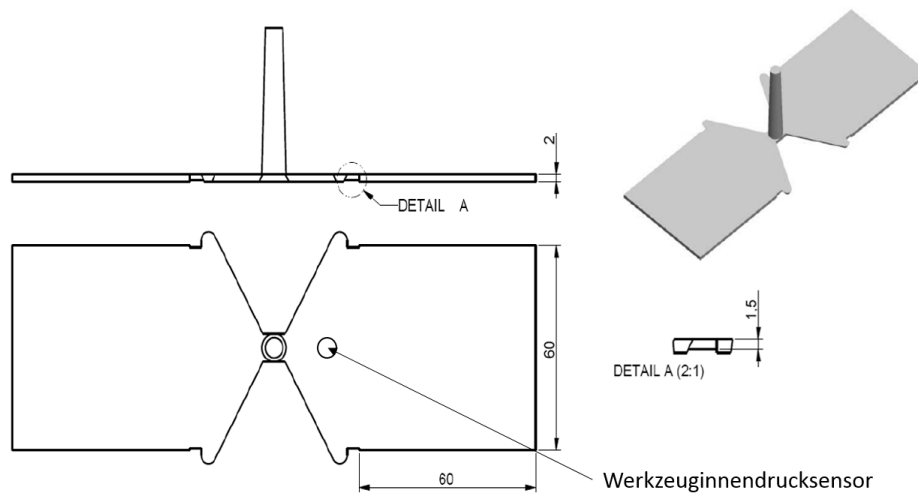


Abbildung 5-5 Bauteil für die Spritzgießsimulation in Anlehnung an das verwendete Spritzgießwerkzeug

Die Lage und Geometrie der Kühlkanäle wurde entsprechend des verwendeten Werkzeugs in die Simulation integriert. Zusätzlich zu dem im Werkzeug vorhandenen Drucksensor wurden weitere Sensorpunkte in der Simulation in die Kavität integriert. Die Lage der Sensorpunkte ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Neben den an den Sensorpunkten verfügbaren Messwerten sind weitere Daten verfügbar, die direkt am Inlet berechnet werden sowie allgemeine Verläufe von Maximal-, Minimal- und Mittelwerten.

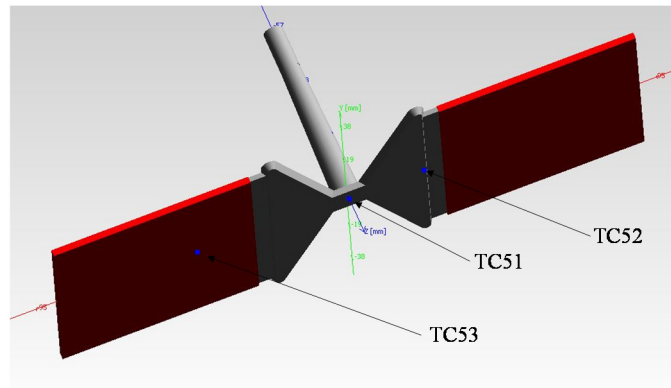


Abbildung 5-6 Lage der Sensorkpunkte in der simulierten Werkzeugkavität

Eine Zusammenfassung der Einstellparameter und Variationen ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Dabei wird ein besonderer Fokus auf den Einspritzvorgang gelegt sowie auf die Ausprägung der Phänomene bei unterschiedlicher Prozessführung.

Tabelle 5-1 Prozesseinstellung in der Spritzgießsimulation und Verarbeitungsrichtlinien

	PBT	PA 6	PC
Restfeuchte [%]	< 0,01; 0,03; 0,06; 0,09	0,03; 0,09; 0,13; 0,16	< 0,01; 0,03; 0,06; 0,09
Alterungszeit [s]	0, 360, 720, 1260	0, 360, 720, 1260	-
Massetemperatur [°C]	260	260	300
Werkzeugtemperierung [°C]	80	80	80
Nachdruckhöhe [bar]	310	355	355
Volumenstrom [cm³/s]	62,83 ; 75,40 ; 87,96		
Schneckenvorschubgeschwindigkeit [mm/s]	50; 60; 70		
Ref. Abkühlgeschwindigkeit [K/min]	50	50	50

Die Nachdruckzeit wird entsprechend der Siegelzeit des Angusses gewählt. Der Fülldruck ergibt sich aus der Vorgabe des Volumenstroms. Für eine Vergleichbarkeit der Simulation mit den Spritzgießversuchen werden die Volumenströme entsprechend den Einspritzgeschwindigkeitsvorgaben und der Geometrie der Plastifiziereinheit definiert. Dabei wird die Bandbreite von 50-70 mm/s berücksichtigt, um zusätzliche Einflüsse aus der Korrelation zwischen Materialverhalten und Prozessführung abzubilden. Die Angaben werden entsprechend der einstellbaren Schneckenvorschubgeschwindigkeit für einen direkten Vergleich zur Diskussion der realen Prozesseinflüsse in Kapitel 6.2 angegeben. Die Massetemperaturvorgaben sind durch die Herstellerrichtlinien festgelegt. Als Umschaltkriterium kann entweder eine Druckgrenze oder eine Volumengrenze angegeben werden. Einflüsse aus der Wahl dieses Kriteriums werden im Weiteren in die Diskussion integriert.



## 5.2 Simulation und Darstellung von alterungsbedingten Prozesseinflüssen

Die Einflüsse von Alterungseffekten auf das Material und die Variation der Materialeigenschaften sind jeweils auf eine Beeinflussung der Viskosität zurückzuführen. Innerhalb der Diskussion der Prozesseinflüsse wird der Einfluss von zeit- und temperaturbedingten chemischen Strukturänderungen gemeinsam mit den physikalisch bedingten Strukturänderungen diskutiert. Auf Grund der besonderen Prozessrelevanz variierender Restfeuchte wird hierauf ein Fokus gelegt. Der Einfluss der chemischen Strukturänderung ist im laufenden Produktionsprozess als konstant zu betrachten und lediglich bei Maschinenstillständen im Wiederanfahrverhalten oder variierenden Verweilzeiten von Relevanz. Wie bereits dargestellt, werden die Einflüsse durch Chargenschwankungen ebenfalls in einer variierenden Viskosität wiedergespiegelt. Auf Chargenschwankungen im Speziellen wird nicht detailliert eingegangen, da die entsprechenden Phänomene durch Viskositätsschwankungen denen der Alterungseinflüsse innerhalb der rheologischen Modellbildung entsprechen. In den Darstellungen der Simulationsergebnisse ist die Stützstellenanzahl aus den berechneten Kennzahlverläufen zur übersichtlichen Darstellung reduziert.

### 5.2.1 Resultierender Druckverlauf in der Füllphase

Bei einer Vorgabe des Volumenstroms resultiert der notwendige Fülldruck am Inlet aus der Materialviskosität sowie den Rahmenbedingungen durch die Prozesseinstellung und Werkzeugkavität. Diese Prozessgröße eignet sich daher zur Darstellung von Einflüssen durch eine Variation der Viskosität. Die resultierenden Druckverläufe zeigen die Charakteristik der Kavität und der Fließwiderstände bei der Überströmung der Umlenkung und Staubalken. Bei der Simulation mit einem definierten, konstanten Volumenstrom während der Einspritzphase und einem Umschalten in die Nachdruckphase bei einem Füllgrad von 99 % können deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Materialzuständen für den Druck am Inlet dargestellt werden. Abbildung 5-7 zeigt den resultierenden *Massedruck am Inlet*  $p_{inlet}$  bei den untersuchten *Einspritzgeschwindigkeiten*  $v_{inj}$ , respektive *Einspritzvolumenströmen*  $\dot{V}_{inj}$  für Variationen der Materialviskosität durch Alterungseinflüsse am Beispiel von PBT über der Einspritzzeit.

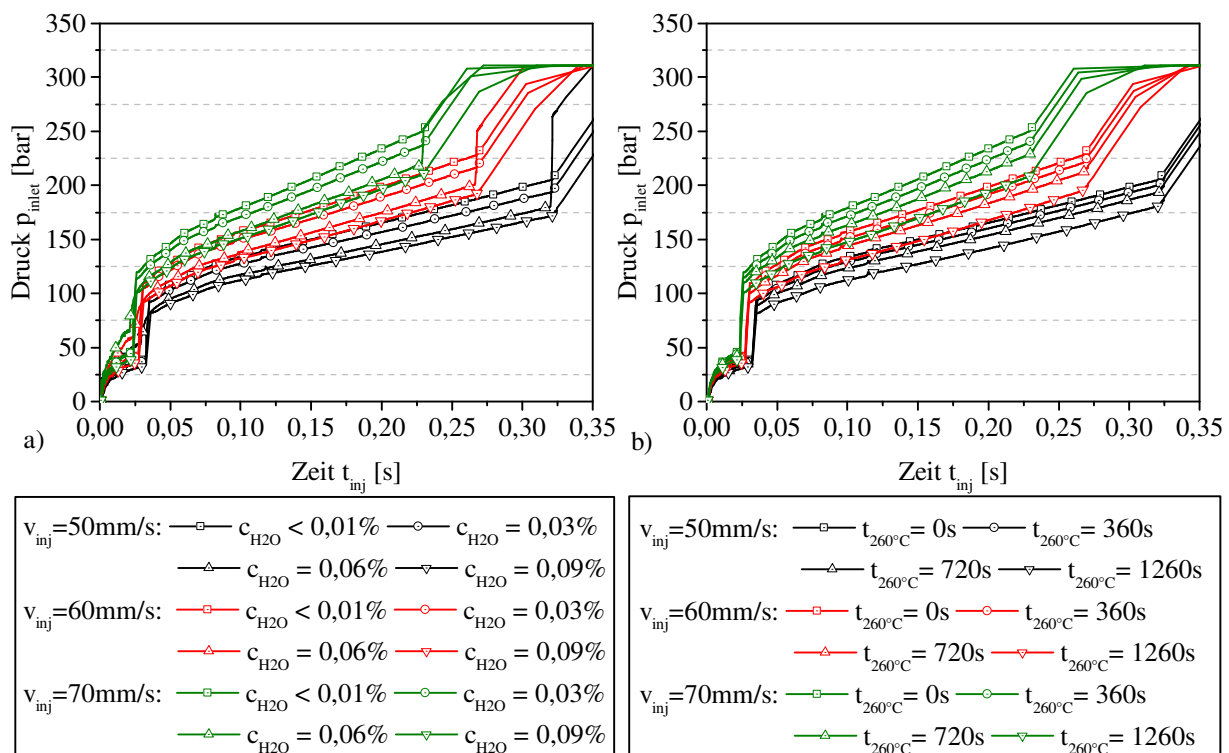


Abbildung 5-7 Druckverlauf in der Einspritzphase bei konstanten Einspritzvolumenströmen am Beispiel von PBT mit  
a) Restfeuchteeffekten und b) temperaturabh. Zeiteinflüssen durch Alterungseffekte

Da sowohl der Restfeuchteanteil mit dem beschriebenen physikalische Einfluss auf die Polymerstruktur als auch die chemische Strukturänderung zu einer Reduzierung der Viskosität bei PBT führen, wird in beiden Fällen eine Reduzierung des am Inlet anfallenden Druckniveaus abgebildet. Die Ausprägung der Prozesseinflüsse ist dabei zum einen durch die Alterungseffekte bedingt, zum anderen durch die Wahl des Prozesspunktes. So nimmt einerseits je Alterungsstufe die Druckdifferenz zu, andererseits zeigt auch eine Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit einen direkten Einfluss auf den Druckverlauf sowie die Ausprägung der Prozesseinflüsse.

Als Beispiel für gegenläufige Effekte durch chemische und physikalische Strukturänderungen wird im Vergleich PA 6 herangezogen. Die zeit- und temperaturabhängigen Effekte führen über die dargestellte Nachkondensation zu einer Viskositätszunahme über die chemischen Strukturänderungen. Dem entgegen wirkt die Reduzierung der Viskosität bei steigendem Restfeuchteanteil. In Abbildung 5-8 ist der resultierende Druckverlauf für verschiedene Materialzustände bei konstantem Einspritzvolumenstrom dargestellt. Für den direkten Vergleich der Einflussausprägungen wird ein beispielhafter Referenzprozesspunkt mit einem Volumenstrom von  $\dot{V}_{inj} = 87,96 \text{ cm}^3/\text{s}$ , respektive  $v_{inj} = 60 \text{ mm/s}$  abgebildet. Als initialer Materialzustand wird eine Konditionierung ohne zusätzliche zeit- und temperaturbedingte Alterungseffekte definiert, bei der von einer minimalen Restfeuchte von  $c_{H_2O} = 0,03\%$  ausgegangen wird.

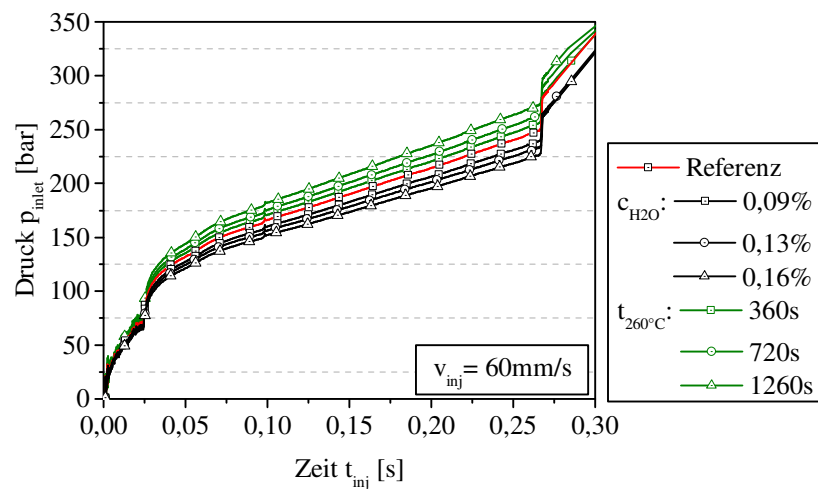


Abbildung 5-8 Druckverlauf in der Einspritzphase bei konstanten Einspritzvolumenströmen unter Alterungseinflüssen am Beispiel von PA 6

Die deutlich höhere, zulässige Restfeuchte führt in diesem Fall zu einer größeren Reaktionsbandbreite in den Prozessparametern. Während beim PBT durch die Materialzustandsänderung von einer Reduzierung der Viskosität ausgegangen werden kann, sind bei PA 6 sowohl eine Zunahme als auch eine Abnahme der Viskosität durch eine Veränderung der physikalischen und chemischen Struktur möglich. Dies wirkt sich entsprechend auf den Druckverlauf am Inlet in der Einspritzphase aus. Erwartungsgemäß ist hier sowohl eine Zunahme des resultierenden Gegendruckes beim Füllen der Kavität als auch Abnahme festzustellen. Dies ist bei der Betrachtung von weiteren qualitätsrelevanten Parametern zu berücksichtigen. Der Vergleich der Materialkonditionierungsstufen von  $c_{H_2O} = 0,03\%$  bis  $c_{H_2O} = 0,09\%$  bei PA 6 zeigt, dass bereits innerhalb des vorgegebenen Verarbeitungsfensters mit einem signifikanten Einfluss auf den Prozess gerechnet werden muss. Dies bietet neben den Variationseinflüssen auch Potential für eine gezielte Prozessoptimierung.

Der reduzierende Einfluss der physikalischen Strukturänderung durch höhere Restfeuchteanteile auf den Druck am Inlet während der Einspritzphase kann auch für das amorphe Polycarbonat bestätigt werden. Hier wirkt sich die allgemein höhere Viskosität des Materials bei gleichem Volumenstrom direkt auf den notwendigen Fülldruck aus. Entsprechend sind auch die Unterschiede zwischen den Druckkurven durch das Viskositätsniveau und die Einflussstärke der physikalischen Strukturänderung bedingt. Für den definierten Referenzprozess ist in Abbildung 5-9 der Einfluss der Viskositätsvariation auf den notwendigen Druck am Inlet dargestellt.

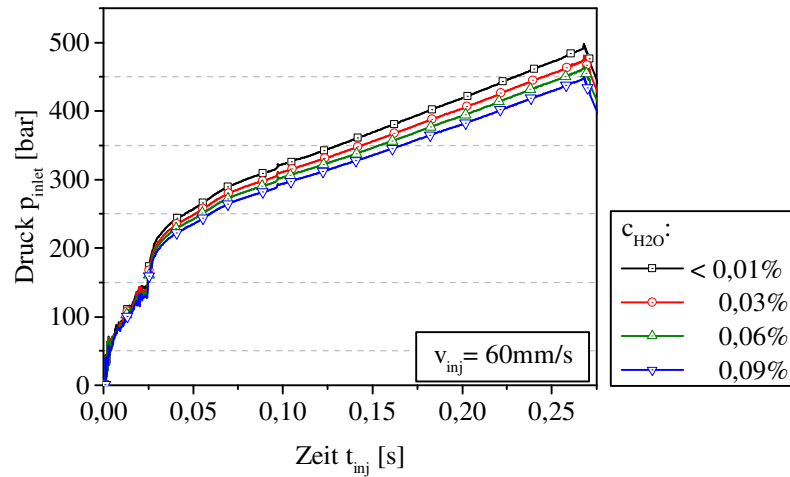


Abbildung 5-9 Druckverlauf in der Einspritzphase bei konstanten Einspritzvolumenströmen unter Restfeuchteinflüssen am Beispiel von PC

Die dargestellten Einflüsse auf den Prozess durch die Materialkonditionierung wirken sich, neben dem Druckverlauf in der Einspritzphase, direkt auf weitere qualitätsrelevante Prozessgrößen und Prozesskennzahlen aus. In Kapitel 5.2.3 werden beispielsweise die Einflüsse auf die Massetemperatur sowie den Energieeintrag diskutiert. Mit dem Massedruck während der Einspritzphase, als einen für die Bauteiloberfläche und Morphologie entscheidenden Parameter, ist von einer direkten Qualitätsbeeinflussung durch die Variationen zu rechnen. Dies kann in der Simulation nicht explizit dargestellt werden und ist daher bei der Prozesscharakterisierung und Validierung der Simulationsergebnisse in Kapitel 6.2 zu vertiefen.

## 5.2.2 Diskussion der Umschaltkriterien

Bei der Betrachtung der Druckunterschiede ist neben dem generellen Niveau der Zustand am Umschaltpunkt ein sehr gut referenzierbares Vergleichskriterium für die Prozessbedingungen. Hierdurch kann der aus dem Verlauf der Einspritzphase resultierende Einfluss der Viskositätsunterschiede differenziert werden. Dabei sind die Randbedingungen der Simulation und hinterlegten Umschaltkriterien zu beachten. Das Umschaltkriterium von der volumenstromgeregelten Füllphase in die druckgeregelte Nachdruckphase wird entweder druck- oder füllgradabhängig definiert. Das Umschaltkriterium bei einem bestimmten Füllgrad ist mit einem weg- oder volumenabhängigen Umschaltkriterium bei realen Spritzgießprozessen vergleichbar. Allerdings ist die Annahme einer inkompressiblen Berechnung des Füllvorgangs sowie eines Kavitätsgegendruckes von 1 bar insbesondere bei hohen Füllgeschwindigkeiten zu beachten. Das Verhalten der Rückströmsperre ist idealisiert, da ein viskositätsabhängiges Schließverhalten der Rückströmsperre in der Simulation nicht abgebildet wird.

Die bisher dargestellten Druckverläufe mit einem füllgradabhängigen Umschaltkriterium zeigen einen deutlichen Druckunterschied am Umschaltpunkt resultierend aus der Variation im Materialverhalten. In Tabelle 5-2 sind die Druckunterschiede  $\Delta p_{\text{inlet}}$  bezogen auf den Referenzprozess zum Zeitpunkt des Umschaltens am Beispiel von PA 6 und PC für verschiedene Konditionierungsstufen zusammengefasst.

Tabelle 5-2 Druckunterschiede am Inlet zum Zeitpunkt des füllgradgeregelten Umschaltens

Alterung ( $c_{\text{H}_2\text{O}}$ / $t_A$ )		<0,01%	0,03%	0,06%	0,09%	0,16%	720s	1260s
PC	$p_{\text{inlet}}$ [bar]	496,48	480,72	465,63	449,83	-	-	-
	$\Delta p_{\text{inlet}}$ [%]		-3,17	-6,21	-9,40	-	-	-
PA 6	$p_{\text{inlet}}$ [bar]	-	251,06	-	241,88	228,21-	265,52	279,64
	$\Delta p_{\text{inlet}}$ [%]	-	-	-	-3,66	-9,10	5,76	11,38

Die Simulation zeigt Druckunterschiede am Umschaltpunkt im Vergleich zum Referenzprozess von bis zu  $\Delta p_{\text{inlet}} = 11,38\%$  durch eine zeit- und temperaturabhängige Viskositätszunahme. Dies tritt bereits bei einer

geringen Überschreitung der Verarbeitungsgrenzen auf. Die physikalischen Einflüsse durch erhöhte Restfeuchteanteile zeigen eine direkte Reduzierung des Druckes am Umschaltpunkt. Für das betrachtete PA 6 wird für den Referenzprozess ein Unterschied von bis zu  $\Delta p_{inlet} = 9,10\%$  in der Simulation abgebildet. Die physikalischen Effekte zeigen auch bei dem betrachteten PC bereits bei den geringen Restfeuchteanteilen reduzierende Einflüsse mit einem Druckunterschied von bis zu  $\Delta p_{inlet} = 9,40\%$  am Umschaltpunkt.

Die Druckunterschiede wirken sich auf das Übergangsverhalten in die Nachdruckphase und damit auf das  $p_vT$ - und Schwindungsverhalten des Bauteils aus. Auswirkungen auf das Regelungsverhalten einer Spritzgießmaschine bei einem realen Prozess können in der Simulation nicht abgebildet werden, sind aber zu erwarten. Dies gilt insbesondere für den Druckverlauf und das Regelverhalten der Schneckenbewegung in der Übergangsphase zum Nachdruckniveau.

Im Vergleich zu einem füllgradabhängigen Umschaltpunkt treten bei einem druckabhängigen Umschaltkriterium entsprechend der Alterungseinflüsse deutliche Unterschiede im Füllgrad der Kavität zum Zeitpunkt des Umschaltens auf. Variationen in der Materialviskosität führen bei aktueller Prozessführung zu einem zeitlich versetzten Erreichen des Umschaltkriteriums. Je nachdem ob eine Steigerung der Viskosität oder eine Abnahme im Vergleich zum Referenzprozess vorliegt, kann somit ein Überspritzen der Kavität oder ein Füllen unter Nachdruck die Folge sein. Die Kavität ist am Referenzpunkt bei  $p_M = 250\text{bar}$  nahezu vollständig gefüllt, das eingestellte volumenspezifische Umschaltkriterium mit einem Füllgrad von  $V_U = 99\%$  wird erreicht. Auf Grund der idealisierten Umschaltregelung in der Simulation, kann der resultierende Druckverlauf im Falle einer Füllung im Einspritzen von über 99 % nicht abgebildet werden, da durch die Annahme eines inkompressiblen Materialverhaltens bei vollständiger Kavitätsfüllung direkt in die Nachdruckphase umgeschaltet wird. Daher wird ausgehend von der dargestellten initialen Materialkonditionierung nur der Unterschied im Füllgrad bei einer Umschaltdruckvorgabe für eine Steigerung der Viskosität dargestellt. Die Differenz im Füllgrad der Kavität bei Erreichen des Umschaltkriteriums  $\Delta V_U$  sind in Tabelle 5-3 für die Untersuchungen der temperaturabhängigen Zeiteinflüsse auf die Prozessführung bei PA 6 zusammengefasst.

Tabelle 5-3 Füllgradunterschiede bei 250 bar am dem Zeitpunkt des druckgeregelten Umschaltens

Alterung	Referenz	360 s	720 s	1240 s
$V_U$ [%]	99,00	94,01	90,08	84,12
$\Delta V_U$ [%]	-	-5,04	-9,01	-15,03

Die Ergebnisse für PA 6 zeigen, dass hier mit einer massiven Beeinflussung des Prozesses zu rechnen ist und bereits temperaturbedingte Zeiteinflüsse im Bereich einer Verweilzeit von  $t_A = 1260\text{s}$  zu Unterschieden im Füllvolumen von  $\Delta V_U = 15,03\%$  führen. Im Bereich der Herstellerrichtlinien für die Verweilzeit sind die Einflüsse noch sehr gering und zeigen erst, entsprechend den rheologischen Untersuchungen, bei einer Überschreitung der Verweilzeitvorgaben deutliche Prozesseinflüsse. Bei einer nicht vollständigen Füllung der Kavität am Umschaltkriterium sind die Auswirkungen in der Prozessführung durch einen starken Druckabfall und entsprechende Prozessschwankungen bekannt. Idealisiert wird in der Simulation ein maximaler Druckanstieg vorgegeben (maximaler Druckanstieg am Umschaltpunkt 2000 bar/s), der zu einem zeitlichen Versatz bei der Erreichung des Nachdrucks führt. Dies ist mit den resultierenden Reaktionen im Umschaltvorgang in einem realen Prozess nicht vergleichbar. Die hochdynamischen Regelvorgänge und resultierenden Druckpeaks oder Druckabfälle während des Umschaltvorgangs, die aus einem Spritzgießprozess bekannt sind, können nicht abgebildet werden.

Die resultierenden Unterschiede bis zum Umschaltkriterium können in der Simulation sehr prozessnah dargestellt werden. Das Regelverhalten einer Anlage wird allerdings in der Simulation innerhalb der Umschaltphase stark idealisiert. Aus diesem Grund wird im Weiteren ein füllgradabhängiges Umschaltkriterium vorausgesetzt, um die Einflüsse der idealisierten Randbedingungen auf ein Minimum zu reduzieren. Als qualitätsrelevante Einflüsse durch Schwankungen in der Materialviskosität, sind der Unterschied im resultierenden Maschendruck oder die Unterschiede im Füllgrad der Kavität am Umschaltpunkt festzuhalten. Im Folgenden wird vertieft auf den Einfluss der Konditionierung auf das Verhalten im Nachdruck und auf die Massenströme eingegangen.

### 5.2.3 Einflüsse auf qualitätsrelevante Prozesskennzahlen

Aus der Simulation können Informationen über qualitätsrelevante Parameter und Kennzahlen gewonnen werden, die in diesem Detaillierungsgrad nicht im Spritzgießprozess erfasst werden können. Anhand dieser Kennzahl werden Auswirkungen von Prozessschwankungen auf die qualitätsrelevanten Parameter dargestellt sowie Anforderungen an eine optimierte Prozessregelung definiert. Dies sind zum einen die bereits diskutierten Druckläufe sowie Druckunterschiede und deren Auswirkung auf die Prozessführung. Zum anderen wird im Folgenden neben der Massetemperatur die Kennzahl *mass packed through inlet*  $mpti$  als Bauteilgewichtsäquivalent diskutiert, um Einflüsse auf die Schwindung darzustellen. Des Weiteren können integrale Kennzahlen gebildet werden, die Unterschiede im Prozess verdeutlichen und einen Vergleich zur realen Prozessführung und Übertragung der gewonnen Informationen zulassen.

#### 5.2.3.1 Einflüsse auf das Bauteilgewicht und die Druckübertragung

Die Einflüsse von Restfeuchte auf das Bauteilgewicht im Spritzgießprozess sind hinreichend bekannt. Dabei wird bei verschiedenen Prozessregelungen das Bauteilgewicht als Qualitätskriterium und Indexgröße für andere Qualitätsanforderungen, wie die Maßhaltigkeit, herangezogen. Die Einflüsse auf dieses Qualitätskriterium sind zu großen Teilen auf das verschleiß- und viskositätsabhängige Schließverhalten der Rückströmsperre sowie die Kompensation der Schwindung im Nachdruck zurückzuführen. Bedingt durch Viskositätsschwankungen treten Bauteilgewichtsunterschiede durch das veränderte Druckübertragungsverhalten in der Nachdruckphase sowie die bereits diskutierten Variationen am Umschaltpunkt auf. Die Unterschiede im Bauteilgewicht werden daher quantitativ durch die Kennzahl  $mpti$  abgebildet. Die Kennzahl wird in der Simulation aus dem Volumenstrom im Nachdruck sowie dem hinterlegten spezifischen  $pVT$ -Verhalten entsprechend der Materialdichte bestimmt und bildet die Massenzunahme in der Nachdruckphase ab. Dabei ist das idealisierte Übergangsverhalten von der Einspritz- in die Nachdruckphase zu beachten als auch die ebenfalls idealisiert angenommene Rückströmsperre.

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Nachdruckphase, wobei durch eine idealisiert inkompressible Einspritzphase bis zu einem Füllgrad von 99 % eine vergleichbare Datenbasis zu Beginn der Betrachtungen gegeben ist. Als Beispiel für ein bedingt durch Alterungseinflüsse sowohl steigendes als auch sinkendes Viskositätsniveau wird das Materialverhalten des untersuchten PA 6 herangezogen. Die in Abbildung 5-10 dargestellte Entwicklung der Kennzahl  $mpti$  für unterschiedliche Viskositätsniveaus und Alterungseinflüsse verdeutlichen den Einfluss des Materialverhaltens auf das resultierende Bauteilgewicht.

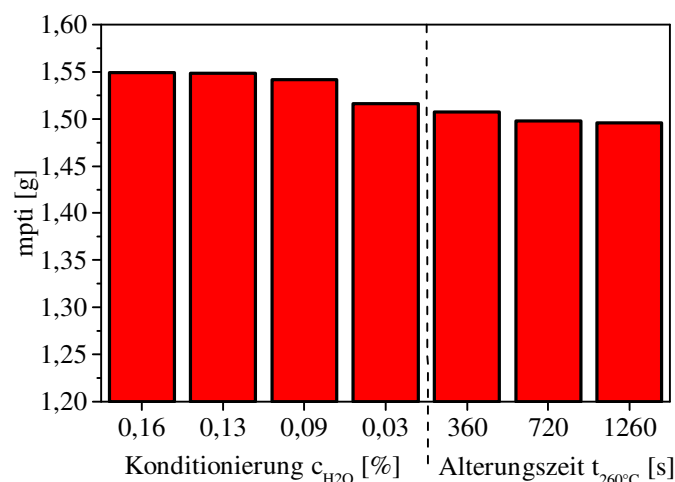


Abbildung 5-10 Massenzunahme in der Nachdruckphase am Beispiel von PA 6 für den Referenzprozess und Variation der Viskosität durch Konditionierung und temperaturabhängige Zeiteinflüsse bei konstantem Nachdruckniveau

Das unterschiedliche Druckniveau zu Beginn der Nachdruckphase sowie die Einflüsse der Viskosität als Fließwiderstand auf die Druckübertragung bei konstantem Nachdruckniveau am Inlet resultieren in einem mit steigender Viskosität reduzierten mpti. Wird beispielsweise durch eine erhöhte Restfeuchte die Viskosität reduziert, so wird in der Simulation eine entsprechend zunehmende mpti-Kennzahl dargestellt.

Die in Abbildung 5-11 dargestellten Ergebnisse zeigen für die Massenzunahme während der Nachdruckphase für das untersuchte PC, dass dieser Effekt bereits bei kleinen Restfeuchteschwankungen auftritt. Hier ist bereits bei geringen Restfeuchtezunahmen auf Grund des starken Einflusses auf die Viskosität ein deutlicher Effekt auf die Massenzunahme bei konstantem Nachdruckniveau am Inlet zu beobachten.

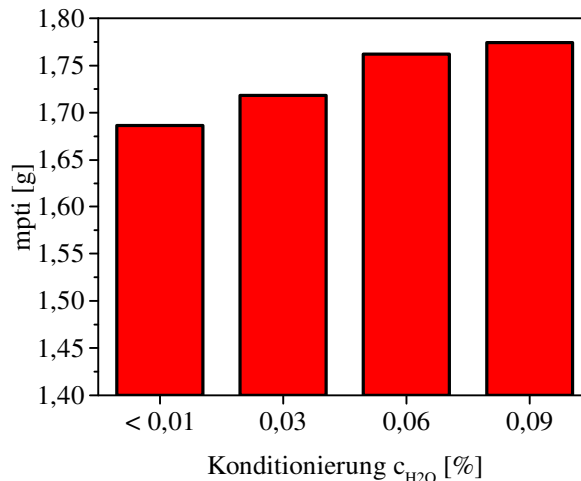


Abbildung 5-11 Massenzunahme in der Nachdruckphase am Beispiel von PC für den Referenzprozess und Variation der Restfeuchte bei konstantem Nachdruckniveau

Dies deckt sich mit den bekannten Untersuchungen, z.B. von *Schiffers* und *Mustafa* [Mu00, Sc09], zum Einfluss der Restfeuchtigkeit bei technischen Kunststoffen auf das Bauteilgewicht beim Spritzgießen. Mit Bezug zu den bekannten Ansätzen zur Betrachtung des Werkzeuginnendruckes, ist in Abbildung 5-12 der Massedruck am Sensorpunkt TC53 für die Simulationsergebnisse des PC für einen zeitlichen Ausschnitt der Nachdruckphase dargestellt. Bei den durch unterschiedliche Restfeuchteanteile beeinflussten Fließwiderständen resultiert bei einem konstanten Nachdruckniveau  $p_{ND}$  und demzufolge konstanten Massedruck am Inlet, am Sensorpunkt ein erhöhter Werkzeuginnendruck  $p_{TC53}$  entsprechend der reduzierten Viskosität. Dies wirkt sich in Korrelation mit dem  $p_vT$ -Verhalten in der Schwindungsphase auf das Bauteilgewicht aus.

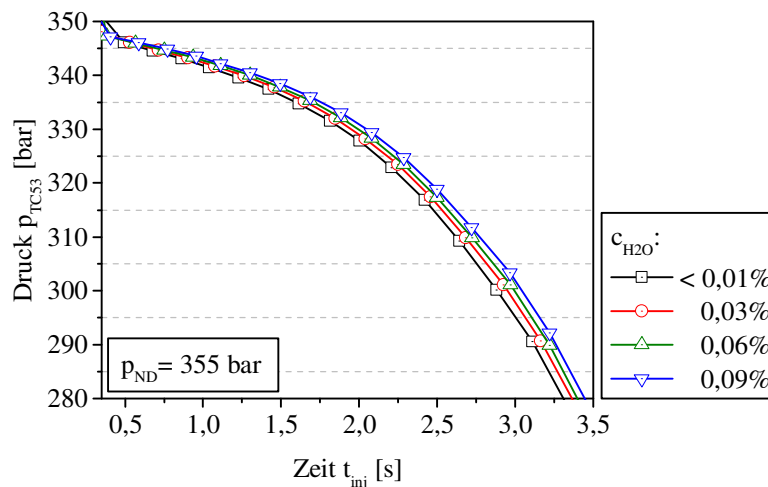


Abbildung 5-12 Verlauf des Werkzeuginnendruckes  $p_{TC53}$  in der Nachdruckphase am Beispiel von PC für den Referenzprozess und Variation des Restfeuchtegehaltes bei konstantem Nachdruckniveau



Die Simulation ist durch die Modellbildung in der Lage die Einflüsse von Alterung auf die Materialeigenschaften und Viskositätsschwankungen auf das Bauteilgewicht darzustellen. Eine direkte quantitative Ableitung und Übertragung der Gewichtsvariationen ist nur tendenziell möglich, da in einem realen Spritzgießprozess die durch Idealisierung ausgeschlossenen Einflüsse aus der Maschinenfähigkeit und der Werkzeugeigenschaften als wesentliche Faktoren hinzu kommen. Die Ausprägung der Variationen ist auf Grund der dargestellten idealisierten Bedingungen entsprechend im realen Prozess höher zu erwarten. Die Kennzahl  $mpt_i$  ist als spezifische Prozessgröße für Vergleiche aber nicht als übertragbares Qualitätskriterium nutzbar. Zur Ableitung von Kriterien für eine Prozessregelung lässt sich in diesem Fall auf die bekannte Anpassung des Nachdruckes entsprechend einer Werkzeuginnendruckregelung oder über ein referenziertes Qualitätsmodell zurückgreifen. Da diese Zusammenhänge aus der Literatur bereits bekannt sind, wird hierauf erst im Bereich der Prozessregelung in Kapitel 6.3.1 wieder eingegangen.

### 5.2.3.2 Einflüsse auf die Massetemperatur und den Energieeintrag

Neben dem Druckverlauf beim Einspritzen und der Massenzunahme während der Nachdruckphase zur Kompensation von Schwindung ist die Massetemperatur des Kunststoffes ein weiterer qualitätsrelevanter Parameter. Durch die Druckunterschiede entsprechend den Viskositätsschwankungen werden über Scherung die dissipativ umgesetzte Energie und damit direkt die Massetemperatur beeinflusst. Hier ist insbesondere die hochdynamische Einspritzbewegung als Phase maximaler Scherung sowie dissipativ umgesetzter Energie von Bedeutung. In Abbildung 5-13 ist der Verlauf der *maximalen Schmelze- oder Massetemperatur*  $T_{M\_max}$  für den Ausgangsbetriebspunkt und verschiedene Materialkonditionierungsstufen für PC dargestellt. Dabei wird deutlich, dass durch die Reduzierung der Viskosität über den physikalischen Einfluss der Restfeuchte auch direkt eine Reduzierung der umgesetzten dissipativen Energieanteile und damit der Massetemperatur zu erwarten ist.

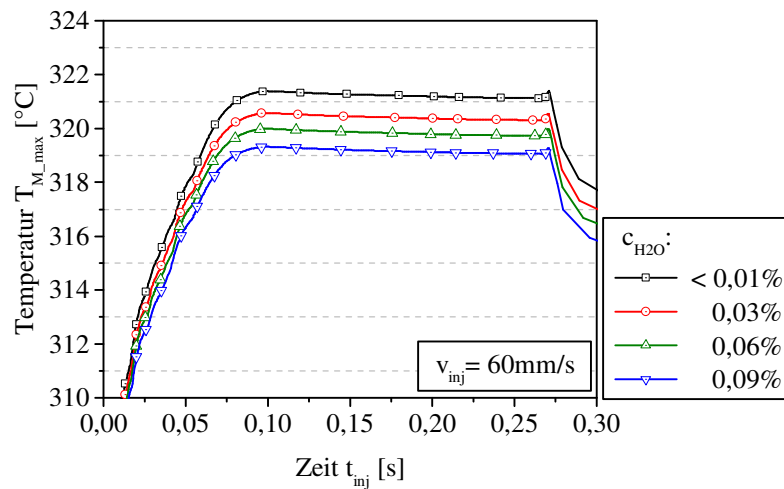


Abbildung 5-13 Verlauf der maximalen Massetemperatur über der Einspritzzeit am Beispiel von PC für unterschiedliche Materialkonditionierungsstufen  $c_{H_2O}$

Die Einflüsse durch die Druck- und Temperaturbedingungen auf das  $p_vT$ -Verhalten und die Schwindung in der Nachdruckphase wurden bereits diskutiert. Die Darstellung verdeutlicht den Einfluss der Viskosität auf qualitätsrelevante Parameter. So wird bei einer vorgegebenen Schmelzetemperatur am Inlet von  $T_M = 300^\circ\text{C}$  durch Dissipation eine deutliche Erhöhung der Massetemperatur innerhalb der hochdynamischen Einspritzphase erzielt. Die Schwankungen in der Materialkonditionierung können nun zu deutlichen Unterschieden in der resultierenden Massetemperatur führen. Dies zeigt sich zum einen im kavitätsübergreifenden Verlauf der maximalen Massetemperatur, zum anderen an den Temperaturdifferenzen sowohl der mittleren als auch maximalen Massetemperatur am Umschaltunkt, die einen direkten Einfluss auf das  $p_vT$ -Verhalten und die Schwindungskompensation in der Nachdruckphase haben.

Durch die physikalischen Einflüsse auf die Polymerstruktur und eine Reduzierung der Viskosität ist insbesondere mit einer niedrigeren Massetemperatur zu rechnen. Bei der Betrachtung der Einflüsse durch Alterung bei

dem untersuchten PA 6 muss sowohl mit von Reduzierung, also auch von einer Zunahme der Massetemperatur ausgegangen werden. In Abbildung 5-14 ist die maximale sowie *mittlere* Massetemperatur  $T_{M\_avg}$  für die Simulation der Alterungseinflüsse auf den Spritzgießprozess für PA 6 dargestellt.

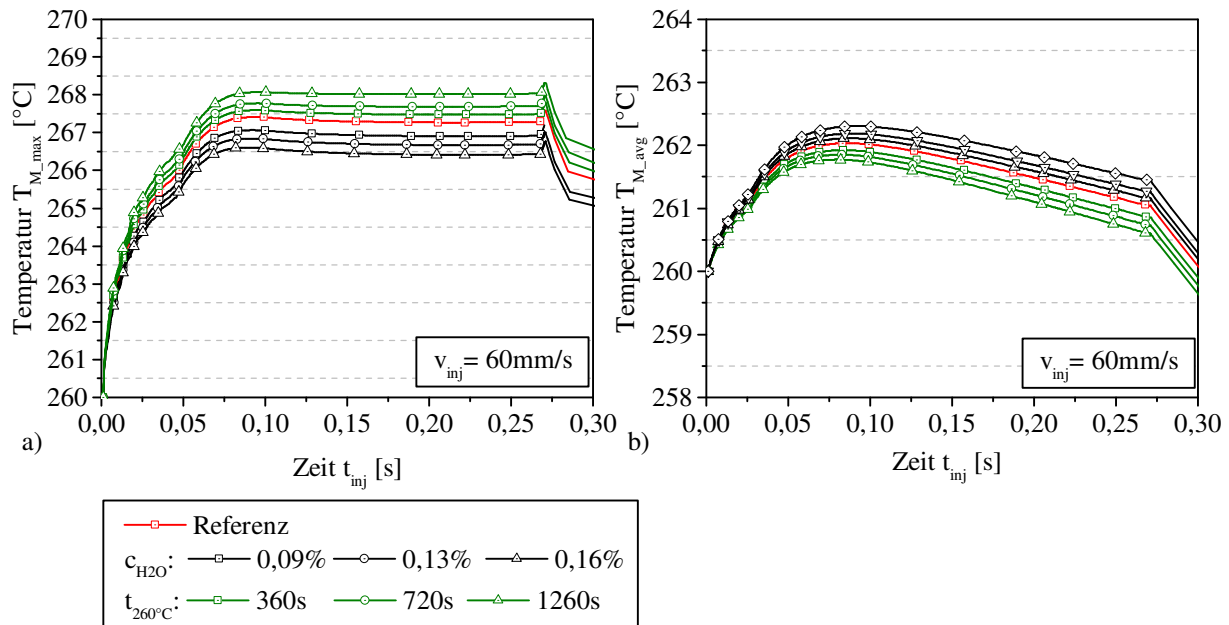


Abbildung 5-14 Verlauf der maximalen und mittleren Schmelzetemperatur über der Einspritzzeit am Beispiel von PA 6

Die dargestellten Temperaturverläufe bestätigen den deutlichen Einfluss der Konditionierung auf die resultierenden Prozessbedingungen. Durch die beim Einspritzen entstehende Scherbelastung des Materials wird die Temperatur durch dissipativ umgesetzte Energieanteile erhöht. Die mittlere Temperatur verdeutlicht, dass es sich nicht nur um lokale Effekte handelt, sondern das gesamte Bauteil eine andere Temperatur erfährt. Die Korrelation zwischen der eingebrachten Dissipation und der resultierenden Massetemperatur verdeutlicht der Vergleich des Massedruckintegrals innerhalb der Einspritzphase und der maximalen Massetemperatur für Variationen der Materialkonditionierung. Entsprechend des notwendigen Fülldruckes entwickeln sich das Druckintegral und die dissipativ in eine Massetemperaturzunahme umgesetzte Energie mit steigender Viskosität zu höheren Massetemperaturen. Für das untersuchte PA 6 ist dieser Vergleich in Abbildung 5-15 dargestellt. Das Druckintegral wird nach Formel 3-2 entsprechend der Fließzahl  $F_Z$  bestimmt. Dabei wird das Intervall für die Bildung des Druckintegrals entsprechend vom Beginn der Einspritzphase bis zum Erreichen des Umschaltkriteriums gesetzt.

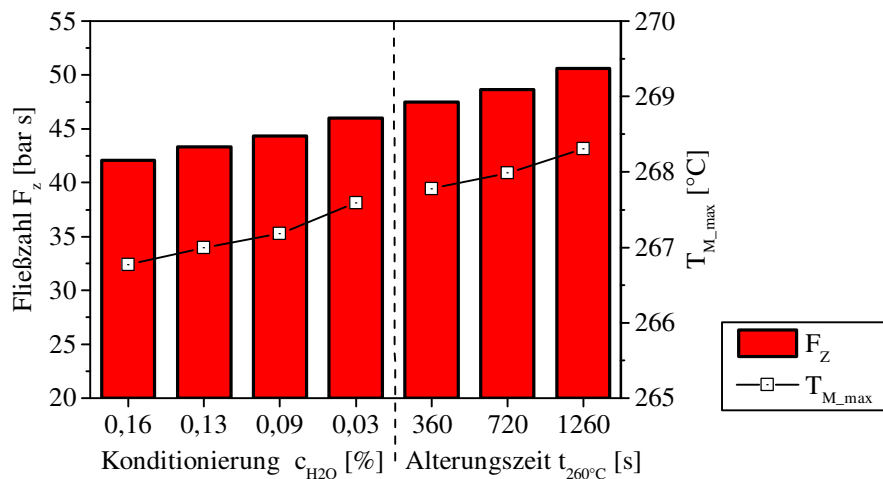


Abbildung 5-15 Vergleich der Fließzahl mit dem Verlauf der maximalen Schmelzetemperatur über der Materialkonditionierung  $c_{H_2O}$  und Alterungszeit  $t_{260^\circ C}$  am Beispiel von PA 6



Die Einflüsse variierender Massetemperaturen auf das  $p\dot{v}T$ -Verhalten wurden bereits diskutiert. Als qualitätsrelevanter Parameter werden durch Unterschiede in diesem Bereich zum einen der morphologische Aufbau innerhalb der Abkühlbedingungen im ersten Kontakt zur Kavität beeinflusst. Zum anderen sind zunehmende Massetemperaturen im Hinblick auf Verfärbungen und einer thermische Schädigung des Materials mit Einfluss auf mechanische Eigenschaften als kritisch zu betrachten.

### 5.3 Entwicklung einer Regelstrategie zur Steigerung der Prozessqualität

Die dargestellten Einflüsse durch variierende Materialkonditionierung und Alterungseinflüsse auf den Prozess zeigen, dass eine Reproduzierung eingestellter Maschinenparameter nicht ausreichend ist, um konstante Qualitätskriterien sicherzustellen. Für eine Betrachtung des Bauteilgewichts kann mit Bezug zu den dargestellten Vorarbeiten die Anpassung des Nachdruckes an die Prozessbedingungen als Kompensationsstrategie herangezogen werden. Bei einer Erweiterung der Qualitätskriterien und Anforderungen an die Prozessführung ist dieses Vorgehen alleine nicht ausreichend.

Die idealisierten Bedingungen in der Simulation bezogen auf das Schließverhalten der Rückströmsperre ermöglichen eine hochgenaue volumetrische Füllung des Werkzeugs bis zum Umschaltkriterium. Eine wichtige Anforderung an eine neue Prozessführung ist daher, Streuungen durch das Schließverhalten der Rückströmsperre zu vermeiden. Eine möglichst konstante volumetrische Füllung der Kavität unabhängig von der Materialkonditionierung und dem Schließverhalten der RSP ist durch eine adaptive Bestimmung des Umschaltpunktes sicherzustellen. Dieser Punkt kann allerdings nur mit Bezug zur Prozessregelung am realen Spritzgießprozess diskutiert werden. Daher soll an dieser Stelle auf die Ausführungen in Kapitel 6.3.1 verwiesen werden.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen eine signifikante Beeinflussung des Druck- und Temperaturprofils innerhalb der Einspritzphase, die sich auch auf die Abkühl- und demnach Schwindungsbedingungen in der Nachdruckphase auswirkt. Insbesondere bei thermisch kritischen Materialien kann eine Temperaturerhöhung zu einer Schädigung des Materials führen und negative Einflüsse auf mechanische und optische Eigenschaften hervorrufen. Bezogen auf die resultierenden Massedrucke wird insbesondere die erste Schicht und der morphologische Aufbau durch die Bedingungen in der Einspritzphase beeinflusst. Eine Zielsetzung ist demnach, sowohl die Druck- als auch Temperaturbelastung des Materials bei der Ausbildung der Oberfläche und Bauteilmorphologie konstant zu halten. Die Bauteileigenschaften werden somit unter möglichst konstanten Prozessbedingungen definiert. Bei der Betrachtung der Temperatur sind insbesondere die eingebrachte Energie und die demnach zur Verfügung stehende, dissipative Wärmemenge von Bedeutung. Über eine konstant eingebrachte Energiemenge kann sowohl das Druckprofil als auch die Massetemperatur konstant gehalten werden. Dies wird bei der Annahme eines  $pVT$ -Verhaltens, das nicht durch Alterung, Konditionierung oder Chargenschwankungen beeinflusst wird, ebenfalls positiven Einfluss auf die gleichmäßige Kompensation der Schwindung in der Nachdruckphase haben, da von konstanten Bedingungen in Bezug auf Massedruck und Massetemperatur in der Übergangsphase zur Schwindungskompensation ausgegangen werden kann. Des Weiteren sind hohe Druckunterschiede, wie sie in der Simulation dargestellt werden konnten, am Umschaltpunkt aus Sicht der Maschinenregelung und Reproduzierbarkeit beim Übergang in die Nachdruckphase zu vermeiden.

#### 5.3.1 Adaptive druckgeregelte Prozessführung

Auf Grund der in der Simulation idealisierten Prozessführung wird der Fokus dieser Diskussion auf die Reduzierung der Druckunterschiede sowie auf eine Konstanz in der thermischen Belastung der Schmelze gelegt. Dabei ist eine Regelung basierend auf resultierenden Prozesskennzahlen zielführend. Um die geforderten Kriterien für die Prozessqualität zu erfüllen, wurde in der Simulation eine adaptive druckgeregelte Prozessführung auf Basis eines Referenzprozesses implementiert. Innerhalb der Simulationsumgebung ist es möglich, auf der einen Seite einen Einspritzvolumenstrom vorzugeben, auf der anderen Seite kann auch ein Druckprofil am Inlet als Sollwertverlauf hinterlegt werden. Ausgehend von einem gelernten Betriebspunkt werden die notwendigen adaptiven Maßnahmen auf die hinterlegten Prozesskennzahlen bezogen. Die Vorgehensweise zur Ableitung der notwendigen Daten und Implementierung der Prozessregelung ist in Abbildung 5-16 schematisiert.

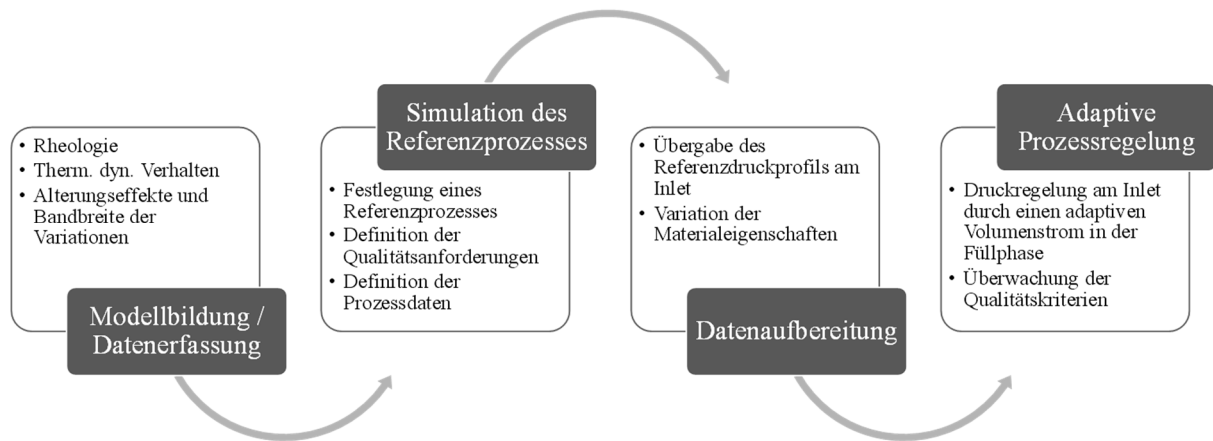


Abbildung 5-16 Schematische Darstellung zur Implementierung der adaptiven Prozessregelung in der Simulation

Die Bereiche der Datenerfassung und Modellbildung zur Beschreibung der Materialeigenschaften sind bereits ausgiebig diskutiert worden. Grundsätzlich ist zur Darstellung prozessnaher Einflüsse und Kompensationspotentiale eine detaillierte Materialcharakterisierung essentiell. Grundlage des Prozessmodells in der Simulation ist die geschwindigkeits- bzw. volumenstromgeregelter Einspritzphase, ein füllgradabhängiger Umschaltzeitpunkt sowie die druckgeregelter Nachdruckphase. Die Daten für den Referenzprozess werden über die in Kapitel 5.1.2 dargestellten Prozesseinstellungen sowie über die Definition der Materialkonditionierung innerhalb der Verarbeitungsgrenzen aus der Simulation gewonnen. Der initiale Materialzustand bezieht sich dabei auf die minimal zu erzielende Restfeuchte sowie keine temperaturabhängigen, zeitbedingten Alterungseinflüsse auf die chemische Struktur.

Ausgehend von dem hinterlegten Referenzprozess wird die Füllphase nicht mehr über einen konstanten Volumenstrom oder ein konstantes Volumenstromprofil geregelt, sondern über die Vorgabe einer hinterlegten Druckkurve. Die adaptiv angepasste Stellgröße ist der bei konventioneller Prozessführung konstante Volumenstrom. Abgeleitet aus den in Kapitel 5.2.1 dargestellten Korrelationen zwischen Einspritzgeschwindigkeit, Materialviskosität und dem resultierenden Druckverlauf kann hieraus ein direkter Einfluss auf die Prozessparameter und Qualitätskriterien abgeleitet werden. Die Vorgabe des Druckprofils definiert den notwendigen Volumenstrom, respektive Einspritzgeschwindigkeit, um Viskositätsänderungen im Hinblick auf die Druckvorgabe zu kompensieren. Die druckgeregelter Einspritzphase für unterschiedliche Materialkonditionierungen und den Referenzbetriebspunkt bei PA 6 ist in Abbildung 5-17 dargestellt.

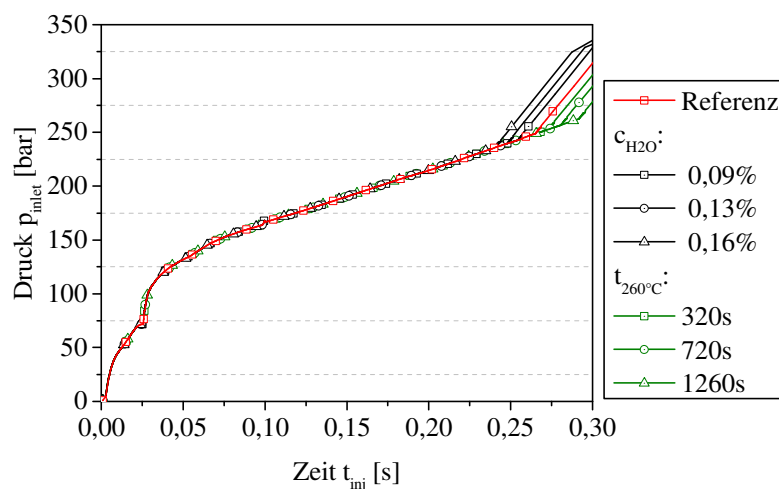


Abbildung 5-17 Druckverlauf in der Füllphase für die druckgeregelter Einspritzphase am Beispiel von PA 6

Erfolgt der Füllvorgang des Werkzeugs mit einer vorgegebenen Druckkurve, so wird bei den unterschiedlichen Materialviskositäten eine Adaption des *Volumenstroms in der Einspritzphase*  $\dot{V}_{inj}$  notwendig. Demnach variiert die resultierende Einspritzzeit bis zum Umschaltzeitpunkt. Mit einer vorgegebenen Druckkurve als Sollprofil, die aus der Simulation mit volumenstrom geregelter Einspritzphase des Referenzbetriebspunktes resultiert, und einem füllgradabhängigen Umschaltzeitpunkt zeigt Abbildung 5-17 diese Verschiebung der Füllzeit für PA 6 mit unterschiedlicher Konditionierung. Grundsätzlich gilt, je niedriger die Viskosität im Vergleich zum Ausgangszustand und dem hinterlegten Betriebspunkt ist, desto höher liegt die notwendige Einspritzgeschwindigkeit. Entsprechend der Verläufe des Druckes am Inlet sind in Abbildung 5-18 die resultierenden Volumenströme dargestellt.

Der Volumenstrom des Materials, bei dem über den Restfeuchteanteil eine reduzierte Viskosität eingestellt wurde, liegt während der gesamten Füllphase deutlich über dem des trockenen Referenzmaterials. Wird über die zeit- und temperaturabhängige Nachkondensation die Viskosität erhöht, so wird bei der adaptiven Prozessführung der resultierende Volumenstrom in der Einspritzphase reduziert. Der Volumenstrom bei einer minimalen Restfeuchte von  $c_{H_2O} = 0,03\%$  entspricht dem des Referenzbetriebspunktes und wird durch die Druckregelung reproduziert.

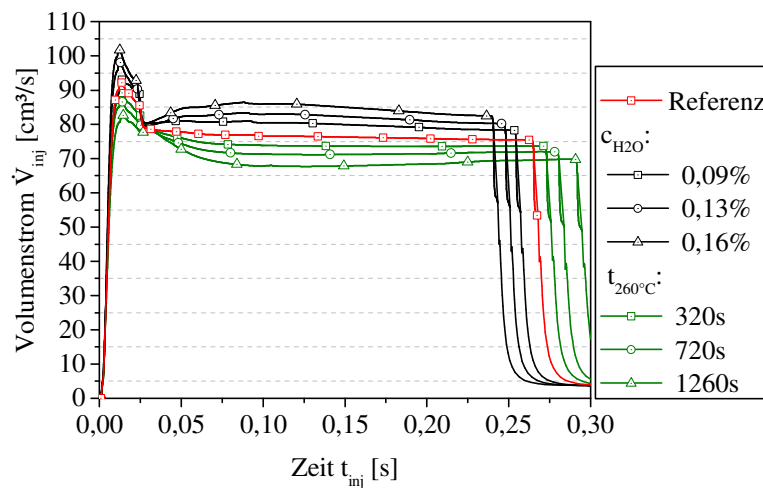


Abbildung 5-18 Volumenstromadaption als Stellgröße zur Regelung des Einspritzdruckprofils am Beispiel von PA 6

Die hinterlegte Druckkurve wird über die Anpassung des Volumenstroms am Inlet reproduziert. Für die untersuchten Materialien PBT sowie PC und die entsprechenden Konditionierungseinflüsse kann die Funktionsfähigkeit des Regelkonzeptes ebenfalls bestätigt werden. Die Implementierung ist analog durchzuführen.

### 5.3.2 Einfluss der Regelstrategie auf qualitätsrelevante Parameter

Ein wichtiges Qualitätskriterium neben dem Massedruck ist die Konstanz des Massetemperaturprofils. Anhand der Prozessregelung können Temperaturdifferenzen in der Einspritzphase nahezu vollständig vermieden werden. Dabei wird die maximale Massetemperatur in einem minimalen Toleranzbereich konstant gehalten. Die Auswirkungen auf das Temperaturprofil durch die Prozessregelung sind in Abbildung 5-19 am Beispiel von PA 6 sowie PC dargestellt. Der Verlauf der mittleren Massetemperatur zeigt, dass auch innerhalb des Bauteils während des Füllvorgangs mit einem sehr konstanten thermischen Verhalten zu rechnen ist.

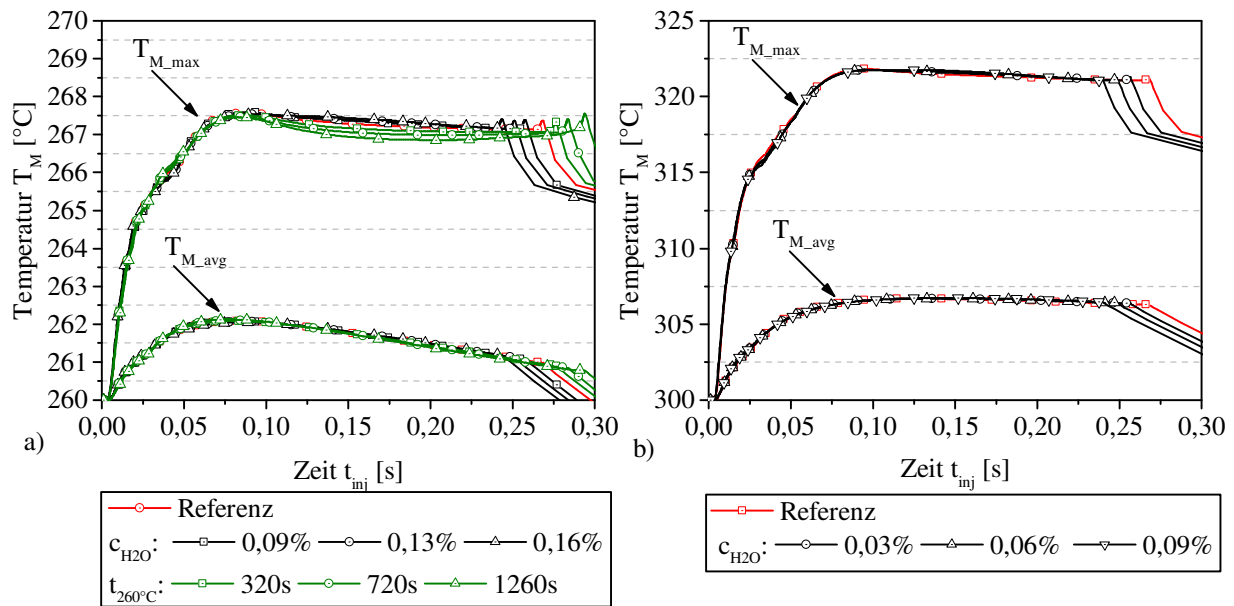


Abbildung 5-19 Verlauf Massetemperatur über der Einspritzzeit bei Regelung des Einspritzdruckprofils am Beispiel von a) PA 6 und b) PC für variierende Materialviskositäten auf Grund von Alterungseinflüssen

Auf Grund des idealisierten, volumengeregelten Umschaltkriteriums wird eine konstante Füllung bei Ende der Einspritzphase garantiert. Die Prozessführung ermöglicht konstante Bedingungen sowohl im Hinblick auf den Massedruck als auch auf die aus der Scherbelastung resultierende Massetemperatur während der Einspritzphase. Durch die Vorgabe des Referenzdruckprofils können Unterschiede in der Massetemperatur und damit Differenzen in der eingebrachten Energie deutlich reduziert werden.

Die theoretische Abbildung der Prozesseinflüsse und Kompensationspotentiale im Hinblick auf die Qualitätskriterien verdeutlichen die Notwendigkeit einer adaptiven Prozessführung beim Spritzgießen. Die dargestellten Anforderungen an diese Prozessführung können durch eine adaptive druckgeregelte Einspritzphase bezogen auf einen Referenzbetriebspunkt umgesetzt werden. Dabei ist zu beachten, dass die innerhalb der Simulation idealisiert abgebildeten Variationen im realen Spritzgießprozess mit verstärkter Ausprägung zu erwarten sind. Diese aus der Materialcharakterisierung und Prozesssimulation abgeleiteten Prozesseinflüsse und neuartige Regelstrategien für eine konstante Prozess- und Produktqualität sind im Weiteren durch eine Prozesscharakterisierung und Implementierung einer auf dem vorgestellten Konzept basierenden Prozessregelung im realen Spritzgießprozess zu verifizieren.

## 6 Intelligente Prozessregelung zur Qualitätssteigerung

Zur Kompensation von Einflüssen durch Alterung, Konditionierung oder Chargenschwankungen auf die Viskosität konnte in der Simulation ein neuartiger Ansatz vorgestellt werden. Allerdings sind die Annahmen aus der Simulation nicht direkt auf den Spritzgießprozess übertragbar. Zur Entwicklung einer Qualitätsregelung müssen spezifische Qualitätskriterien für die Prozessqualität und die Bauteilqualität definiert werden. Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen beziehen sich dabei auf zwei Qualitätskriterien. Zum einen wird das Bauteilgewicht als einfach zu prüfendes Kriterium mit Bezug zur Maßhaltigkeit herangezogen. Dieses Kriterium ist direkt an jedem Probenkörper messbar und kann auf die aktuelle Prozessführung bezogen werden. Zum anderen wird die Oberflächenqualität der Probenkörper im Hinblick auf Defekte durch Feuchtigkeitsschlieren diskutiert. Weitere allgemeine Kriterien ergeben sich aus der Konstanz im Massedruck und im Massetemperaturprofil in Korrelation mit der eingebrachten Energie in der Einspritzphase.

Insbesondere vor dem Hintergrund komplexer Produkte und hybrider Verarbeitungsprozesse nimmt die Prozesskontrolle einen wichtigen Stellenwert ein. Die hohe Integrationstiefe aktueller Verarbeitungs- und Veredelungsverfahren benötigt in den Schnittstellen der Prozesse ein hohes Maß an Prozesskontrolle und Robustheit. Vor der Implementierung des Regelkonzeptes werden die Einflüsse von Viskositätsschwankungen am Beispiel von Restfeuchtevariationen im Spritzgießprozess dargestellt. Durch die Inlinedetektion der veränderten Prozessbedingungen können die Simulationsergebnisse validiert und Prozessgrößen für die Umsetzung der Regelstrategie definiert werden. Dabei sind die Qualitätskriterien auf Prozesskennzahlen zu referenzieren.

### 6.1 Darstellung der Versuchsumgebung und Datenverarbeitung

Im Folgenden wird der verwendete Versuchsaufbau zur Durchführung der Prozesscharakterisierung und Implementierung der Prozessregelung beim Spritzgießen dargestellt. Die Versuche wurden im Labor des Institutes für Produkt Engineering *ipe* durchgeführt.

#### 6.1.1 Spritzgießmaschine

Innerhalb der Versuchsreihen wurde eine vollelektrische Spritzgießmaschine in am Markt verfügbarer Ausführung verwendet. Die Maschine verfügt über eine 5-Punkt-Kniehebelschließeinheit, die verwendete Schnecke ist eine 3-Zonen Schnecke. Die folgende Tabelle fasst die Maschinendaten zusammen. Die Rückströmsperre ist als Ringrückströmsperre ausgeführt.

Tabelle 6-1 Zusammenfassung der Maschinendaten

Maschinendaten	
Schließkraft $F_{SK}$ (max.)	1760 kN
Schneckendurchmesser $D$	40 mm
$L/D$ -Verhältnis	25,2
Einspritzdruck (max.)	2500 bar
Schneckenanschubgeschw. (max.)	160 mm/s

Der von der Einspritzeinheit aufgebrauchte Druck wird über eine Kraftmessdose am Schneckenschaft berechnet und liegt als Massedruck in der Steuerung vor. Die Bewegungsachsen der Anlage werden über separate Drehstrom-Synchronmotoren betrieben, die über eine zentrale Frequenzumrichtereinheit angesteuert werden. Die Anlage ist außerdem mit einer Energieerfassung über Strommesszangen und Spannungsabgriffe ausgestattet. Der Zylinder wird über eine Zylinderheizung, die nach dem Widerstandprinzip arbeitet, temperiert. Dabei ist der Zylinder in fünf Zonen unterteilt mit einer *Gesamtheizleistung* von  $P_{HZ} = 16,2 \text{ kW}$ , hinzu kommt eine Wasserkühlung des Einzugsbereiches.

### 6.1.2 Werkzeug

Für die Durchführung der Versuchsreihen wurde ein Werkzeug für die bereits in Abbildung 5-5 dargestellte Kavität verwendet. Die Kavität besteht aus zwei Hälften, von denen die feste Werkzeugseite als Spiegelplatte ausgeführt ist, die bewegliche die entsprechende Kavität des dargestellten Probenkörpers abbildet. Auf der spritzseitigen Spiegelplatte ist ein angussnaher Werkzeuginnendrucksensor integriert. Die Probekörper bestehen aus zwei dünnwandigen, quadratischen Platten mit den Abmessungen 60 mm × 60 mm × 2 mm. Die spritzseitige Werkzeugplatte sowie eine Kavitätenhälfte weisen eine *mittlere Rautiefe* von  $R_{z1} = 0,06\mu\text{m}$  auf. Auf der anderen Seite der Kavität wurde eine mittlere Rautiefe von  $R_{z2} = 0,13\mu\text{m}$  eingestellt.

Zur Temperierung des Werkzeuges wird ein externes Aggregat verwendet. Die in Reihe geschalteten Werkzeughälften wurden während aller Versuche auf  $T_{Wkz} = 80^\circ\text{C}$  vortemperierte und konstant auf gleicher Temperatur gehalten. Die genauen Typenbezeichnungen der zusätzlichen Sensorik sowie Beistellaggregate sind in Kapitel 10 hinterlegt. Auf Grund der einfachen Geometrie des Probenkörpers kann von einer sehr guten Korrelation zwischen dem Qualitätskriterium Bauteilgewicht und der Maßhaltigkeit ausgegangen werden.

### 6.1.3 Messtechnischer Aufbau und Datenverarbeitung

Im Folgenden wird ein Überblick des Aufbaus der Datenanbindung und der Schnittstellen zur Prozessregelung gegeben. Die maschineninterne Kommunikation wird über einen *VARAN-Bus* (*Versatile Automation Random Access Network*) realisiert, einer echtzeitfähigen, flexiblen Maschinenbusstruktur speziell für Anwendungen in der Automatisierungstechnik und Maschinensteuerung. Es gibt einen oder mehrere Bus-Manager, Splitter und die angeschlossenen Clients. Der Bus-Manager initiiert die Kommunikation der einzelnen Busteilnehmer. Die Splitter haben die Aufgabe die Bussignale zu verteilen und an die Clients weiterzuleiten. Als Clients können verschiedene Geräte agieren, wie beispielsweise Sensoren, Steuerungselemente, Aktoren oder auch PC-Schnittstellen. Über einen Splitter wird ein externer Messrechner an den anlageninternen Bus angeschlossen. Die Kommunikation erfolgt über eine Ethernet-Schnittstelle und das *EtherCAT*-Protokoll (*Ethernet for Controller and Automation Technology*). Die Signalaufbereitung erfolgt auf Seite des Messrechners über die Softwareschnittstelle *TwinCAT*. Die im Bussignal vorhandenen Informationen werden einzelnen Variablen zugeordnet, wie beispielsweise Massedruck, Temperaturen oder Motordrehmomente. Diese Variablen werden mit einer individuellen Adressierung PC-intern anderen Programmen zur Verfügung gestellt. Zur Weiterverarbeitung der Daten wird die Software *ISG-Virtuos* der Firma *ISG – Industrielle Steuerungstechnik GmbH* verwendet. Die von der Datenschnittstelle bereitgestellten Variablen werden von der Softwareumgebung empfangen und können hier umgerechnet, weiterverarbeitet oder aufgezeichnet werden. Des Weiteren ist die Schnittstelle in der Lage an die Anlagensteuerung Signale wieder zurückzuleiten und hierüber ein Regelkonzept zu realisieren.

Ein wesentliches, für diese Arbeit relevantes Merkmal ist die Echtzeitfähigkeit des Bussystems. Die Softwareumgebung arbeitet mit einem Rechentakt von 1000 Hz. Messsignale werden mit einer Samplerate von 500 Hz an den Messrechner übertragen sowie aus der Softwareumgebung an die Steuerung geleitet. Hierdurch sind eine hochauflösende Charakterisierung des hochdynamischen Spritzgießprozesses sowie eine direkte Regelung der Prozessphasen über das externe System möglich. Die Messdaten können in Echtzeit zur Berechnung von Prozesskennzahlen und hierauf basierenden Stellgrößeneingriffen umgesetzt werden. In der über Modulblöcke zusammenstellbaren Oberfläche der Softwareumgebung können die Signale entsprechend aufbereitet und für die Prozessregelung notwendigen Schaltbilder aufgebaut und parametrisiert werden. Des Weiteren ist eine graphische Aufbereitung der Signalverläufe sowie Aufzeichnung möglich. Dabei wird im Weiteren in Zyklusverläufe, die mit einer Auflösung von 500 Hz aufgezeichnet werden, sowie Zykluskenzahlen, die als Einzelwerte je Zyklus zusammengefasst und berechnet werden, unterschieden.

Die in die Spritzgießanlage integrierten Wegaufnehmer und Positionsgeber bieten eine Messauflösung von  $\leq 2\mu\text{m}$  und bei einem Hystereseverhalten von  $\leq 4\mu\text{m}$ , wofür sich eine Messgenauigkeit von  $\leq 6\mu\text{m}$  für die Positionen, Wegsignale und abgeleiteten Geschwindigkeiten ergibt. Hinzu kommt die Messgenauigkeit der

zu Bestimmung des Massedruckes herangezogenen Kraftmessung. Diese ergibt sich aus einem Hystereseverhalten von  $\leq 0,7\%$  sowie maximalen Abweichungen der Linearität von  $\leq 0,7\%$  nach Herstellerangaben zu einer maximalen Kennlinienabweichung von  $\leq 1,0\%$ .

Neben den Signalen zur Charakterisierung des Spritzgießprozesses wurden außerdem zur Überwachung der Qualitätsparameter die Bauteilgewichte erfasst. Die Messung erfolgte über eine Waage und die Daten wurden manuell in eine Datenbank übertragen. Die Charakterisierung weiterer Qualitätsmerkmale wie der Oberflächenqualität erfolgte zum einen durch Messungen an einem konfokalen Lichtmikroskop sowie durch Weißlicht Interferometrie und mit einer digitalen Spiegelreflexkamera. Die Auswertung der bildgebenden Messungen wird bei der Diskussion der Qualitätsparameter dargestellt.

#### 6.1.4 Versuchsdurchführung

Zur Beschreibung des Einflusses von Alterungseffekten und Viskositätsschwankungen auf den Spritzgießprozess sowie auf spezifische Qualitätskriterien werden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wird der Restfeuchtegehalt des Rohstoffes gezielt variiert, um als Störgröße auf den Prozess über Viskositätsschwankungen zu wirken. Die Materialkonditionierung wird während des konstant laufenden Betriebs der Anlage variiert. Neben dem bereits in Kapitel 4 dargestellten Einfluss auf die Viskosität im Vergleich zu Chargenschwankungen oder temperaturabhängigen Zeiteinflüssen führt eine Überschreitung der maximal zulässigen Restfeuchte zu einer Beeinflussung der Bauteiloberfläche. Somit können neben der generellen Betrachtung von Viskositätsschwankungen und deren Prozesseinflüssen auch weitere Qualitätskriterien diskutiert werden. Dies wird im weiteren Verlauf dargestellt.

Die Versuchsreihen wurden mit den bereits charakterisierten Materialien PA 6 sowie PBT durchgeführt. Vor den Versuchsreihen wurde ein robuster Betriebspunkt für die Produktionseinheit nach [Bo94] ermittelt. Durch diese Optimierung wird neben der Robustheit gegenüber Schwankungen durch Prozess-, Umgebungs- und Materialeinflüssen auch der Referenzbetriebspunkt für die Umsetzung der Prozessregelung bestimmt. Der Referenzbetriebspunkt muss dabei innerhalb der vorgegebenen Verarbeitungsbedingungen liegen und alle Qualitätsanforderungen erfüllen. Ausgehend von dem hinterlegten Betriebspunkt werden gezielt Störungen in den Prozess eingebracht, um die Auswirkungen auf die Qualitätskriterien darzustellen und um die für das Prozessmodell notwendige Datenbasis zu erzeugen. Maschineneinstellungen, wie Temperaturniveau, Plastifizierdrehzahl und Schneckenhub, die während der Versuche konstant eingestellt wurden, sind materialspezifisch im Anhang aufgeführt. Die dargestellten Ergebnisse sind immer innerhalb konstanter Umgebungsbedingungen nach einer ausreichenden Einfahrphase ermittelt worden. In dieser Versuchsphase ist, neben der Variation der Materialeigenschaften, ebenfalls eine Variation der Stellgröße zur Kompensation notwendig. Die Ergebnisse werden entsprechend in eine Korrelation zwischen Detektionsparametern und Stellgrößen zur Prozessregelung umgesetzt. Eine abschließende Versuchsreihe validiert die intelligente, autonome Prozessregelung zur Steigerung der Qualität beim Spritzgießen und zur Kompensation der Störgrößen. Die Versuchsdurchführung ist in Abbildung 6-1 schematisiert dargestellt.

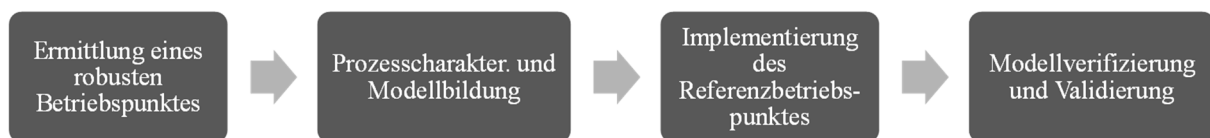


Abbildung 6-1 Schematische Darstellung des Versuchsablaufes zur Entwicklung und Implementierung einer intelligenten, autonomen Prozessregelung

Die Modellbildung bezieht sich hierbei ausschließlich auf die Nachdruckregelung. Die Regelung der Einspritzphase und des adaptiven Umschaltpunktes kann vollständig über eine Kalibrierung anhand des referenzierten Betriebspunktes erfolgen und benötigt keine Datenbasis mit Bezug zu auftretenden Störgrößen.



## 6.2 Inlinedetektion von Prozessschwankungen

In Folgenden werden die Qualitätsanforderungen an die Prozess- und Produktqualität definiert sowie die Auswirkungen durch die eingebrachten Eigenschaftsvariationen des Materials auf diese Kriterien dargestellt. Des Weiteren werden Prozesskennzahlen zur Detektion von Prozessschwankungen vorgestellt, die eine gezielte Prozesscharakterisierung ermöglichen. Die Zielkriterien werden auf den Referenzbetriebspunkt bezogen. Dabei wird innerhalb des Prozesses auch die direkte Korrelation zu den dargestellten Ergebnissen der Prozesssimulation und Implementierung eines Konzeptes zur Qualitätsregelung integriert.

### 6.2.1 Definition der Qualitätsanforderungen an die Prozess- und Produktqualität

In Korrelation zu den Ergebnissen der Simulation wird bei der Prozessbetrachtung das Bauteilgewicht als Qualitätskriterium herangezogen. Materialspezifisch definiert sich das Bauteilgewicht über das Volumen der Kavität und dem  $pVT$ -Verhalten zur Kompensation von Schwindung und Verzug. Auf Grund der einfachen kubischen Geometrie der Kavität kann von einer direkten Korrelation zur Maßhaltigkeit ausgegangen werden. Materialspezifisch wird demnach ein Betriebspunkt eingestellt, bei dem das Bauteilgewicht bei vollständig abgebildeter Kavität ohne Einfallstellen als Referenz herangezogen wird. Neben der Prozessbetrachtung wirkt sich auch das Schließverhalten der Rückströmsperre als Einfluss der Maschinenfähigkeit auf dieses Kriterium aus.

Des Weiteren werden die auf das Material wirkenden Prozessbedingungen, definiert über Druck und Temperatur, betrachtet. Die dissipativ eingebrachte Energie und damit die abhängig von der Scherung resultierende Temperaturerhöhung des Materials, werden über die eingebrachte Antriebsenergie in der Einspritzphase charakterisiert. Diese kann hochauflösend durch die direkte Betrachtung von Drehmoment und Drehzahl der Antriebe dargestellt werden. Dabei korreliert die eingebrachte Antriebsenergie direkt mit der Schneckenanschubgeschwindigkeit sowie dem Fließwiderstand des Werkstoffes, resultierend aus dem anliegenden Druck- und Temperaturniveau, und der Werkzeuggeometrie. Dies konnte bereits indirekt in der Simulation gezeigt werden und ist bei der Betrachtung der Antriebsenergie im realen Prozess zu validieren. Qualitätskriterien neben einem konstanten Bauteilgewicht sind demnach konstante Bedingungen während der Formfüllphase in Bezug auf den Einspritzdruck sowie die Einspritzenergie, respektive Massetemperatur.

Neben diesen direkt quantifizierbaren Größen wird außerdem die Oberflächenqualität als Kriterium herangezogen. Dabei wird die Ausprägung der Hochglanzoberfläche sowie Defekte, durch z.B. Feuchtigkeitsschlieren, betrachtet. Auf Grund des nicht direkt quantifizierbaren Qualitätskriteriums wird eine Diskussion der Oberflächenanalyse, Einflüsse der Feuchtigkeitsschwankungen sowie Prozessregelung gesondert in Kapitel 7.1 betrachtet. Eine Darstellung von Defekten in Bezug auf die Oberflächenqualität und Feuchtigkeitseinflüsse wird vorab in Kapitel 6.2.3 innerhalb der Prozesscharakterisierung vorgestellt.

### 6.2.2 Abbildung materialinduzierter Prozessschwankungen

Für die Detektion von Veränderungen der Materialeigenschaften eignen sich insbesondere die Plastifizierungs- und Einspritzphase. Bei der Betrachtung resultierender Prozesskennzahlen und integraler Größen können bei konstanten Prozessparametern Variationen der Viskosität direkt erfasst werden. Bei der Darstellung von Einflüssen ist insbesondere die Identifizierung von Prozesskennzahlen, die sich für eine Regelung als Stellgröße oder Führungsgröße eignen, zu fokussieren. Mit Bezug zur Prozessführung und gegebenenfalls adaptiven Parametervariationen sind außerdem Kennzahlen zu bilden, die von einer adaptiven Prozessregelung nicht beeinflusst werden. In der hochdynamischen Formgebungsphase können im ersten Schritt Charakterisierungskennzahlen gebildet werden, allerdings ist mit Bezug zur Implementierung einer Prozessregelung von einer Beeinflussung der Kennzahlen durch das Regelkonzept auszugehen. Hier eignet sich insbesondere die Plastifizierungsphase für eine Prozessüberwachung und Prozesscharakterisierung, da in dieser Phase keine adaptiven Parameter in das Regelkonzept integriert werden.

### 6.2.2.1 Plastifizierphase

Beginnend mit der Plastifizierphase zeigen sich Viskositätsänderungen in der notwendigen Antriebsenergie zur Förderung und Plastifizierung des Materialstroms. Bei konstant festgelegter Drehzahl ergibt sich die eingebrachte Energie in der Plastifizierphase aus dem notwendigen Drehmoment über der Zeit zur Bereitstellung des Massepolsters unter vorgegebenen Staudruck. Dabei hat die Viskosität einen signifikanten Einfluss auf das notwendige Drehmoment zur Schneckenrotation und wird durch die physikalischen Strukturänderungen resultierend aus dem Restfeuchteanteil bedingt. Die innerhalb des Zyklus eingebrachte *Heizenergie*  $E_{HZ}$  wird bei der vorliegenden Relation von Plastifizierzeit zu Zykluszeit nicht signifikant durch die Materialwechsel beeinflusst. Bei kurzen Plastifizierzeiten und entsprechend längeren Stillstandzeiten kann die dann hauptsächlich durch Wärmeleitung eingebrachte thermische Energie einen Einfluss auf die nötige Heizenergie, resultierend aus der geringeren dissipativ umgesetzten Energie, zeigen.

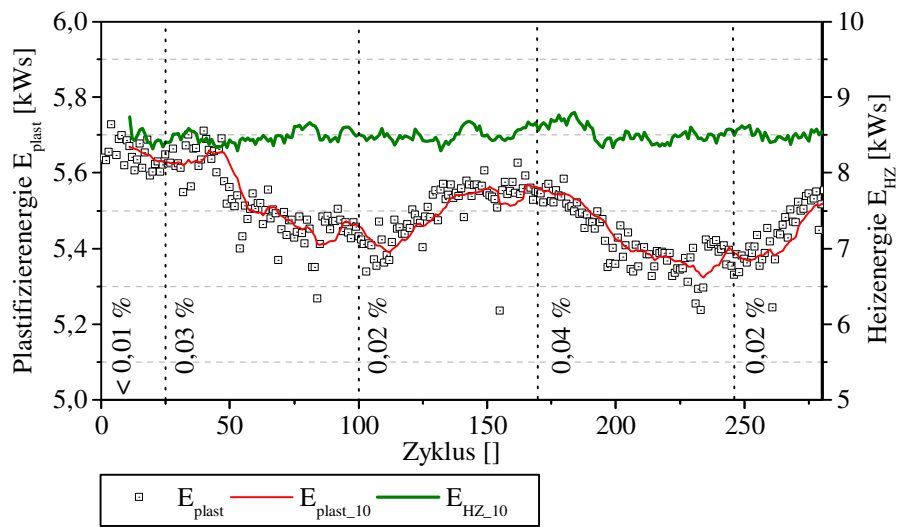


Abbildung 6-2 Verlauf der Plastifizierenergie und eingebrachten Heizenergie bei konstanten Prozessparametern am Beispiel von PBT bei Wechsel der Materialkonditionierung (angegeben in  $c_{H2O}$ )

Die in Abbildung 6-2 dargestellten Unterschiede in der eingebrachten *Plastifizierenergie*  $E_{plast}$  lassen sich auf das notwendige *Plastifizierdrehmoment*  $M_{plast}$  zurückführen. In Abbildung 6-3 ist der Drehmomentverlauf, die *Drehzahl des Plastifizierantriebs*  $n_{plast}$  sowie die Schneckenposition  $s$  für drei repräsentative Beispielszyklen mit unterschiedlichen Restfeuchteanteilen im Material während der Plastifizierphase dargestellt.

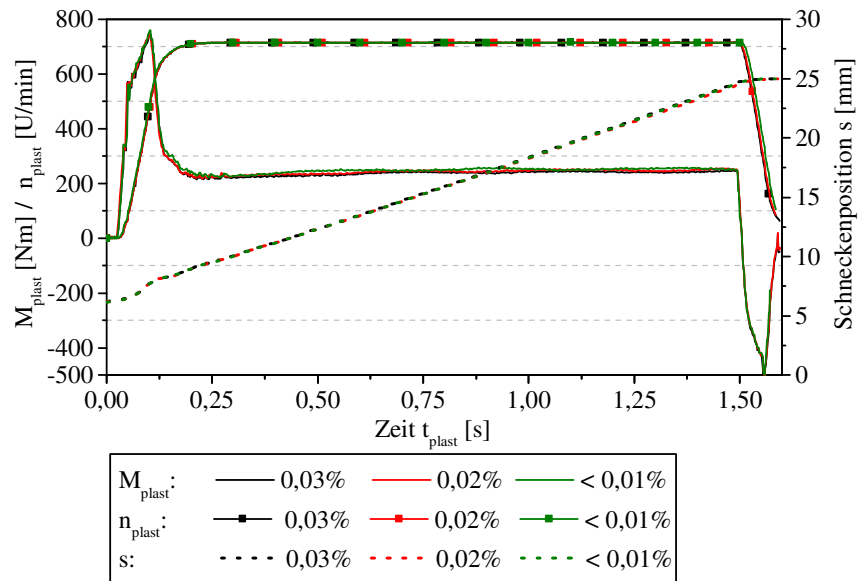


Abbildung 6-3 Verlauf des Plastifizierdrehmomentes, der Drehzahl des Plastifizierantriebs sowie der Schneckenposition für repräsentative Beispielzyklen unterschiedlicher Materialkonditionierung  $c_{\text{H}_2\text{O}}$  für PBT

Deutlich zu erkennen sind die Anteile durch Beschleunigungs- und Bremsprozesse zu Beginn und am Ende der Plastifizierphase. Diese Anteile sind maschinen- und prozessparameterspezifisch konstant. Der Plastifizierhub, dargestellt durch die Schneckenposition, wird durch die Viskosität nicht beeinflusst. In den Bereichen konstanter Drehzahl wirkt hier der Viskositätsunterschied bei konstantem Staudruck auf das notwendige Antriebsmoment. Neben den konstanten Anteilen ist das unterschiedliche Niveau entsprechend der Materialviskosität erkennbar. Die Unterschiede sind in Abbildung 6-4 für die Beispielzyklen in einer Detailansicht dargestellt.

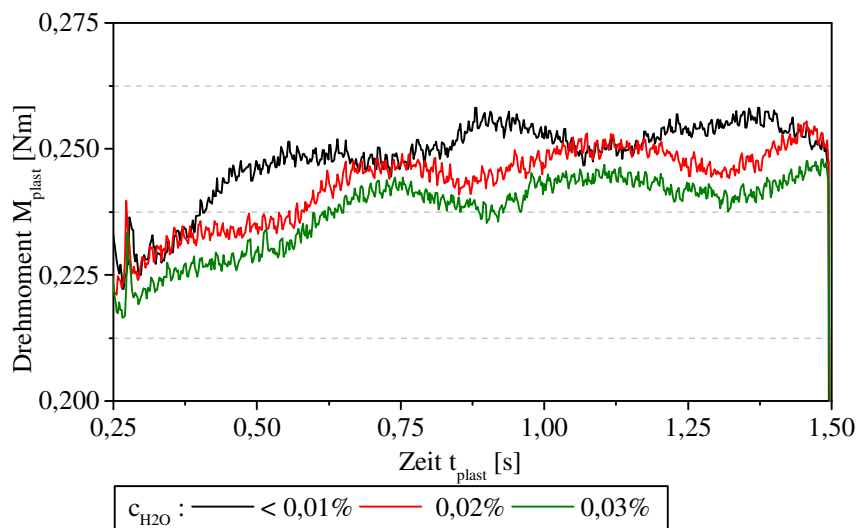


Abbildung 6-4 Verlauf des Antriebsmomentes bei der Plastifizierbewegung für Beispielzyklen mit unterschiedlichen Materialrestfeuchteanteilen für PBT

Die resultierende Plastifizierzeit kann durch die Viskosität beeinflusst werden, dies überlagert sich allerdings durch Effekte aus der Schneckenposition beim Start der Plastifizierung sowie dem Restmassepolster aus dem vorangegangenen Zyklus und damit dem Schließverhalten der RSP. Die direkte Korrelation zwischen der Viskosität des Materials und den Prozessbedingungen kann signifikant im Antriebsmoment dargestellt werden.

Ausgehend von der Betrachtung des Drehmomentverlaufes, kann als charakteristische Kennzahl für den Plastifizierprozess auf der einen Seite die aufgebrachte Antriebsenergie des Plastifizierantriebs während dieser

Phase herangezogen werden. Auf der anderen Seite kann alternativ direkt das notwendige Plastifizierdrehmoment betrachtet werden. Um hier die Einflüsse aus Beschleunigung sowie Bremsprozesses auszuschließen, wird ein mittleres Plastifizierdrehmoment innerhalb eines konstanten Bereichs dieser Prozessphase gebildet. Störungen aus der Beeinflussung der Plastifizierzeit durch die Schneckenposition und des Schneckenstegs am Einzug zu Beginn der Plastifizierung werden durch die Betrachtung des mittleren Antriebsmomentes reduziert. In Tabelle 6-2 sind die Kennzahlen für die Materialkonditionierungsstufen gegenübergestellt. Das Zeitintervall für die Bildung des *mittleren Plastifizierdrehmomentes*  $\bar{M}_{plast}$  ist anlagen- und prozessspezifisch zu wählen und wird in diesem Fall manuell auf  $t_1 = 0,4s$  bis  $t_2 = 1,4s$  innerhalb der Plastifizierphase festgelegt. Bei einer automatisierten Bestimmung der Grenzen sind entsprechende Signale nach dem Beschleunigungsprozess sowie bei Einsetzen der Bremsbewegung heranzuziehen.

Tabelle 6-2  $\bar{M}_{plast}$  und  $E_{plast}$  gemittelt über 10 Zyklen beim Plastifizieren für unterschiedliche Materialkonditionierungen von PBT

Materialkonditionierung $c_{H_2O}$	< 0,01 %	0,02 %	0,03 %
$\bar{M}_{plast}$ [Nm]	250,49	243,52	240,47
$\Delta\bar{M}_{plast}$ [%]	-	2,78	4,00
$E_{plast}$ [kWs]	5,64	5,43	5,37
$\Delta E_{plast}$ [%]	-	3,76	4,88

Abbildung 6-5 zeigt für PA 6, dass diese Korrelation auch für andere Materialien und den Einfluss der Restfeuchtigkeit auf die Viskosität gilt. In der Abbildung ist der Verlauf von  $\bar{M}_{plast}$  bei konstanten Plastifizierbedingungen für unterschiedliche Materialkonditionierungsstufen abgebildet. Auch bei diesem Material lässt sich die Abhängigkeit des notwendigen Antriebsmomentes von der Viskosität darstellen. Der signifikante Einfluss auf das Antriebsmoment zeigt sich insbesondere im Laufe des Versuches nach den Übergangsbereichen und Einflüssen aus dem Anfahrverhalten der Anlage. In Korrelation zu der diskutierten Materialcharakterisierung zeigt sich, dass je höher der Restfeuchteanteil ist, desto niedriger sind die Materialviskosität und damit das notwendige Antriebsmoment.

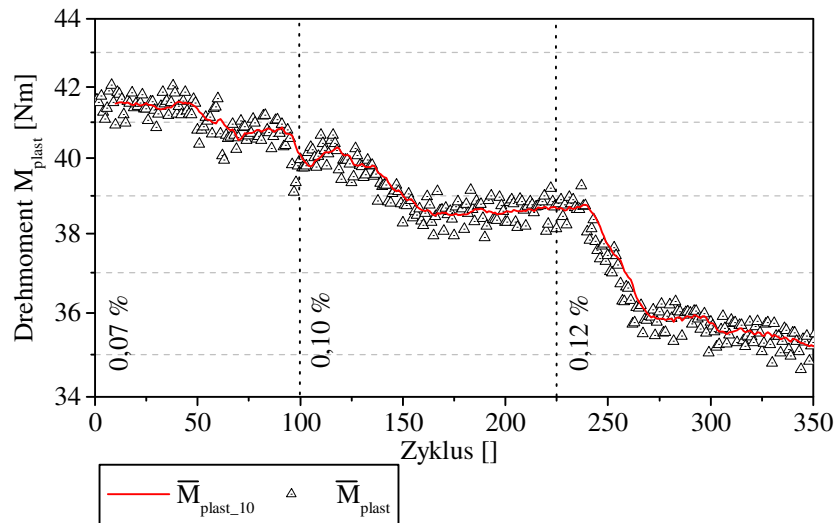


Abbildung 6-5 Verlauf von  $\bar{M}_{plast}$  für unterschiedliche Materialrestfeuchteanteile  $c_{H_2O}$  für PA 6

Als direkte Führungsgröße für eine Qualitätsregelung eignet sich das mittlere Drehmoment allerdings nur bedingt. Zum einen sind die Einflussmöglichkeiten auf die Materialeigenschaften innerhalb der Plastifizierphase nur sehr begrenzt und nicht für eine Kompensation von Chargenschwankungen oder Konditionierungseinflüssen geeignet. Zum anderen unterliegen die Plastifizierenergie sowie das Antriebsmoment weiteren Einflussfaktoren, wie dem aktuellen Temperaturniveau der Plastifiziereinheit, den Umgebungsbedingungen sowie Ver-

schleiß- und Wartungseinflüssen. Eine Unterscheidung der Restfeuchtestufen und Überschreitung der Verarbeitungsvorgaben ist unter Laborbedingungen anhand der dargestellten Prozesskennzahlen möglich. Innerhalb einer Produktion werden die Einflüsse allerdings durch variierende Umgebungsbedingungen und Chargenunterschiede überlagert. Dies lässt insbesondere bei den sehr geringen Unterschieden in der Detektionsgröße keine direkte Zuordnung zu der jeweiligen Störgröße zu. Eine allgemeine Zuordnung zu Prozess- und Viskositätsschwankungen kann allerdings erfolgen.

Die Plastifizierenergie und das mittlere Antriebsmoment können als Prozesskennzahl zur Überwachung der Prozessbedingungen herangezogen werden. Insbesondere bei konstanten Prozessbedingungen und großen Zykluszahlen lässt sich somit eine detaillierte Prozesscharakterisierung darstellen. Die primären Prozessgrößen können für eine allgemeine Materialcharakterisierung herangezogen werden, da eine direkte Erfassung der Materialeigenschaften und Werkstoffgrößen nur begrenzt über zusätzliche Maschinenelemente und Messmittel umgesetzt werden kann. Somit ist eine Zuordnung der Einflussgrößen bei konstanten Prozessbedingungen durch die vorgestellte Prozesscharakterisierung möglich.

#### 6.2.2.2 Einspritz- und Nachdruckphase

Ausgehend vom der Viskosität der Schmelze, vorgegeben über die spezifischen Materialeigenschaften, die Konditionierung und die Plastifizierungsbedingungen, werden die Qualitätskriterien von Spritzgießbauteilen während der Einspritz- und Nachdruckphase definiert. Die bereits in der Simulation dargestellten Einflüsse sind mit dem realen Prozess abzugleichen und die entwickelten Modelle zur Beschreibung des Materialverhaltens zu validieren.

Bei konventioneller Prozessführung wird eine konstante Einspritzgeschwindigkeit oder ein konstanter Einspritzvolumenstrom vorgegeben. Bei komplexeren Werkzeugen wird auch mit Geschwindigkeitsprofilen gearbeitet. Diese werden bei aktueller Maschinenfähigkeit durch die Regelung der Bewegung sehr genau reproduziert. Einflüsse auf die Prozessführung entstehen durch das Schließverhalten der RSP sowie Veränderungen in den Materialeigenschaften. Dies konnte für den resultierenden Druck beim Füllen der Kavität bereits aus der Simulation abgeleitet werden.

Ausgehend von einer mittleren Materialkonditionierungsstufe innerhalb der Verarbeitungsrichtlinien von  $c_{H_2O} = 0,07\%$  können die Einflüsse durch die physikalische Strukturänderung und Viskositätsvariation dargestellt werden. Abbildung 6-6 validiert die Ergebnisse der Simulation aus Kapitel 5. Durch die Variation der Viskosität des Materials über die Konditionierung, wird in der Einspritzphase der Massedruck  $p_M$ , bestimmt über die Kraft am Schneckenchaft, bei konstanter Schneckenanschubgeschwindigkeit  $v_{inj}$  direkt beeinflusst. Auch bei der Prozesscharakterisierung zeigt sich deutlich, dass der resultierende Massedruck mit steigender Viskosität ebenfalls ansteigt sowie eine Druckreduzierung bei geringerer Viskosität auftritt.

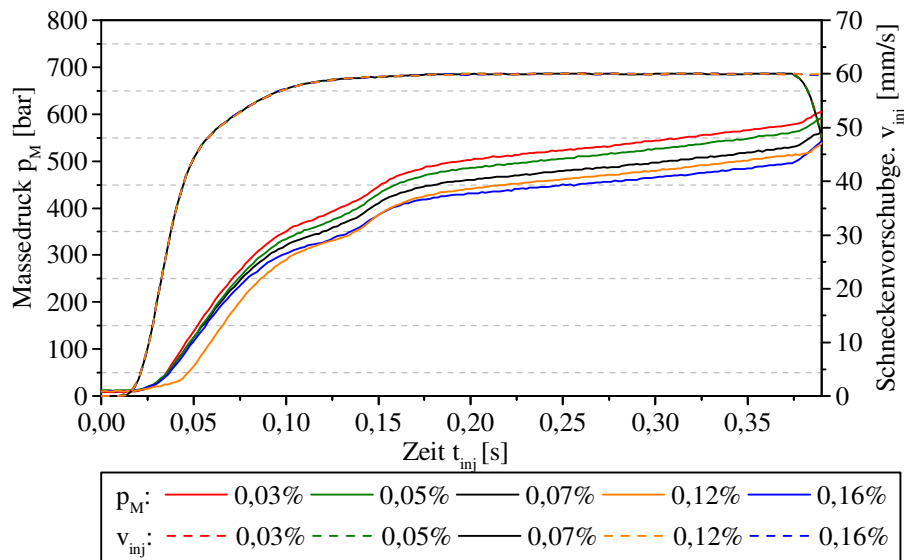


Abbildung 6-6 Verlauf des Massedruckes und der Schneckenverschubgeschwindigkeit für unterschiedliche Materialrestfeuchteanteile für PA 6

Die Schneckenverschubgeschwindigkeit wird entsprechend der Regelgenauigkeit der Maschine reproduziert, so dass am wegabhängigen Umschaltunkt Druckunterschiede von bis zu 85 bar auftreten. Des Weiteren entstehen deutliche Druckpeaks durch das Regelverhalten der Anlage am Umschaltunkt. Beispielsweise variiert der maximale Massedruck  $p_{M,max}$  bereits innerhalb der Verarbeitungsrichtlinien im Vergleich der Konditionierungsstufen  $c_{H_2O} = 0,03\%$  und  $c_{H_2O} = 0,07\%$  zwischen  $p_{M,max,03} = 659,33bar$  und  $p_{M,max,07} = 627,99bar$  um 4,99 %. Weitere Kennzahlen zur Charakterisierung der Unterschiede in den Beispielzyklen sind in der Tabelle 6-3 zusammengefasst.

Neben den bereits aus der Simulation bekannten Einflüssen der Viskosität auf den Formfüllprozess verdeutlicht Abbildung 6-6 zudem die Problematik des Schließverhaltens der Rückströmsperre. Durch die Variation der Viskosität kann das Schließverhalten der RSP beeinflusst werden. So schließt die RSP bei geringerer Viskosität verzögert bei konstanter Beschleunigung der Schnecke. Dies zeigt sich im Vergleich der Druckkurven und Materialkonditionierung für den Zeitpunkt bis zum Erreichen eines Druckreferenzpunktes. Dieser Grenzdruck wird prozessspezifisch so definiert, dass von einer geschlossenen RSP an diesem Druckniveau ausgegangen werden kann.

In Tabelle 6-3 ist das Zeitintervall  $t_{RSP}$  bis zu einer Grenze mit einem Massedruck von  $p_M = 100bar$  abhängig von der Materialkonditionierung angegeben. Im Vergleich der Druckverläufe ist insbesondere die Materialkonditionierung  $c_{H_2O} = 0,12\%$  und  $c_{H_2O} = 0,16\%$  auffällig. Hier zeigt sich ein deutlich verzögerter Druckanstieg zu Beginn der Einspritzphase, was auf ein verzögertes Schließen der RSP und darüber auf höhere Leakageströme zurückzuführen ist. Hinzu kommt ein positionsabhängiges Schließverhalten, das durch die Lage des Rückströmsperrings im System Schnecke-Zylinder bestimmt wird. Der Füllgrad der Kavität zum Zeitpunkt des Umschaltens wird demnach zum einen durch die Maschinenfähigkeit mit Bezug zum Schließverhalten der RSP beeinflusst und zum anderen durch die Materialeigenschaften, insbesondere durch die Viskosität. Beide Einflussfaktoren überlagern sich direkt innerhalb des Einspritzprozesses. Die Beispielzyklen zeigen dabei eine Momentaufnahme des Prozesses, die aber die Einflüsse und Variationsbandbreite repräsentativ darstellen. Die Differenzen im Füllgrad lassen sich zum einen Anhand des *Schneckenweges beziehungsweise der Schneckenposition  $s_{RSP}$  bei Erreichen der Druckgrenze* darstellen, zum anderen verdeutlicht die *Differenz im verdrängten Volumen bis zu der Druckgrenze  $\Delta V_{RSP}$*  die resultierenden Füllgradunterschiede.

Tabelle 6-3 Kennzahlen zur Charakterisierung von Beispielzyklen mit unterschiedliche Materialkonditionierungen bei konstanter Schneckenvorschubgeschwindigkeit und wegababhängigem Umschaltzeitpunkt

Materialkonditionierung $\text{CH}_2\text{O}$	< 0,03 %	0,05 %	0,07 %	0,12 %	0,16 %
$p_{M\_U}$ [bar]	580,00	564,54	531,31	516,97	495,00
$t_{RSP}$ [s]	0,044	0,046	0,046	0,058	0,048
$s_{RSP}$ [mm]	27,4498	27,3673	27,3674	26,8163	27,2818
$\Delta V_{RSP}$ [mm <sup>3</sup> ]		10,36726	10,35469	79,60796	21,1115

Mit Bezug zu den bei konventioneller Prozessführung verfügbaren Umschaltkriterien, kann weder ein weg- oder volumenabhängiges Kriterium, noch ein druckabhängiges Kriterium ein konstantes Füllvolumen und Bauteilgewicht als Qualitätskriterium gewährleisten. Die Schneckenpositionierung und Schneckenvorschubgeschwindigkeit, wie sie in Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 dargestellt sind, können mit sehr hoher Genauigkeit reproduziert werden, die resultierenden Prozessbedingungen und das Füllvolumen allerdings auf Grund der dargestellten Einflussfaktoren nicht. Die Unterschiede im verdrängten Volumen bei Erreichen des Referenzdruckes, entsprechend der Unterschiede im Schneckenweg, werden in Tabelle 6-3 verdeutlicht. Dies wirkt sich, neben den Unterschieden in der Materialkompression durch die Druckunterschiede, direkt auf das resultierende Bauteilgewicht aus.

Ein weiteres aus der Simulation abgeleitetes und für die Prozessführung relevantes Kriterium ist die resultierende Massetemperatur in Korrelation zu der eingebrachten Energie und Schererwärmung des Materials. Abbildung 6-7 verdeutlicht die Einflüsse der Viskosität auf die *eingebrachte Antriebsleistung in der Einspritzbewegung*  $P_{inj}$  und darüber auf die eingebrachte Einspritzenergie.

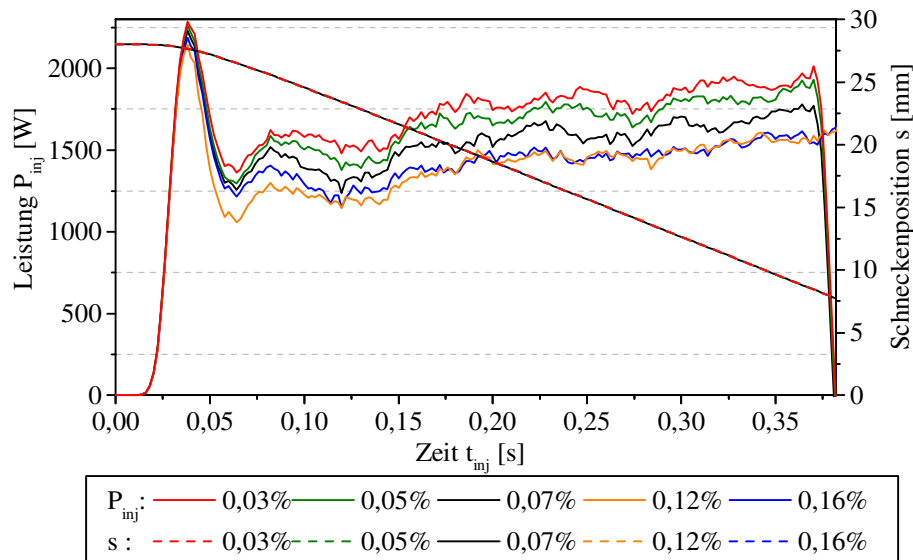


Abbildung 6-7 Verlauf der Antriebsleistung und der Schneckenposition in der Einspritzphase für unterschiedliche Materialrestfeuchteanteile am Beispiel von PA 6

Die dargestellten Differenzen zeigen, dass in Korrelation zu den Simulationsergebnissen von einer Beeinflussung der Massetemperatur aus den Unterschieden in der eingebrachten Antriebsleistung und darüber eingebrachten Einspritzenergie ausgegangen werden muss. Die Unterschiede in der notwendigen Antriebsleistung ergeben sich aus der bei vorgegebener Drehzahl resultierenden konstanten Schneckenvorschubgeschwindigkeit und entsprechend dem resultierenden Massedruck notwendigen Antriebsmoment. In Korrelation zu den aus der Simulation abgeleiteten Annahmen ist die eingebrachte Antriebsleistung entsprechend der Viskosität bei hohem Restfeuchteanteil deutlich reduziert. Steigt die Materialviskosität mit dem Trocknungsgrad des Materials, so ist entsprechend eine höhere Antriebsleistung zur Überwindung des Gegendrucks notwendig. Dies führt zu einer erhöhten Massetemperatur.



Die Einflüsse der Viskosität auf die Nachdruckphase und den Werkzeuginnendruckverlauf sind hinreichend aus der Literatur bekannt und sollen an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden. Eine Diskussion der Einflüsse auf die Nachdruckphase wird bei der Darstellung der Prozessregelung und Kompensation dargestellt.

### 6.2.3 Abbildung von Einflüssen auf spezifische Qualitätskriterien

Die diskutierten Einflüsse aus Maschinenfähigkeit und Materialeigenschaften resultieren in Schwankungen der definierten Qualitätskriterien der Produkte. Bereits in der Simulation konnten Ansätze zur Beeinflussung des  $pVT$ -Verhaltens über die Druck- und Temperaturunterschiede abgeleitet und in der Kennzahl  $m_{pt}$  veranschaulicht werden. Da der Einfluss von Viskositäts- und Feuchtigkeitsschwankungen auf das Bauteilgewicht bereits ausgiebig diskutiert worden ist, soll an dieser Stelle nur an einem Beispiel der Einfluss dargestellt werden. In Abbildung 6-8 wird verdeutlicht, dass bereits der geringe Einfluss auf die Viskosität durch die Steigerung der Restfeuchte zu einem erhöhten Bauteilgewicht führt. Dabei bestätigt die Versuchsreihe, dass mit niedrigerer Viskosität auf Grund des in der Simulation dargestellten, veränderten Druckübertragungsverhaltens insbesondere in der Nachdruckphase ein höherer Massestrom zu einer Zunahme des Bauteilgewichtes führt. Bei Überschreitung der Herstellervorgaben zeigt sich außerdem die bereits bei der Diskussion der Massedruckverläufe angesprochene erhöhte Schwankung der Prozessparameter und die darüber höhere Streuung im Bauteilgewicht. Abbildung 6-8 stellt das resultierende *Bauteilgewicht*  $m_b$  für unterschiedliche Materialviskositäten bei konstanter, konventioneller Prozessführung mit den Grenzen von  $\pm 0,1\%$  um den Mittelwert der Konditionierungsstufe  $c_{H_2O} = 0,07\%$  dar.

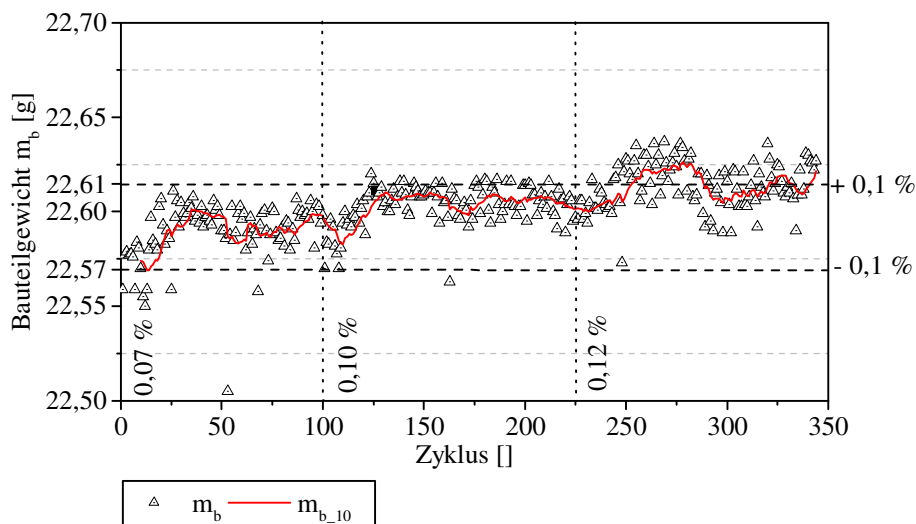


Abbildung 6-8 Einfluss unterschiedlicher Materialrestfeuchteanteile bei PA 6 auf das Bauteilgewicht bei konstanter Prozessführung

Die Darstellung bestätigt die diskutierten Einflüsse aus der Prozesscharakterisierung und die Ergebnisse der Simulation. Daher können auch die Zielanforderungen aus den in der Simulation entwickelten Kompensationsstrategien auf eine Qualitätsregelung beim Spritzgießen übertragen werden. Dies gilt sowohl für die bereits bei Schiffers [Sc09] dargestellte Anpassung des Nachdruckniveaus für ein konstantes Bauteilgewicht als auch für die vorgestellte Strategie der Prozessregelung, um den Massedruck sowie die Massetemperatur konstant zu reproduzieren.

Neben den direkt quantifizierbaren Einflüssen der Viskositätsunterschiede auf die Prozesskennzahlen sowie das Bauteilgewicht als Qualitätskriterium, hat der Restfeuchteanteil ebenfalls einen Einfluss auf die Oberflächenqualität des Formteils. Durch erhöhte Restfeuchteanteile wird innerhalb der Füllphase die Oberfläche durch ausgasende Feuchtigkeitsanteile, die zum Teil an der Werkzeugwand kondensieren, beschädigt. Die Ausbildung und restfeuchtespezifische Ausprägung sowie Lage der Defekte ist je Bauteil unterschiedlich. In Abbildung 6-9 sind Beispiele der Hochglanzoberfläche a) innerhalb des zulässigen Restfeuchtebereiches ohne



Defekte sowie b) bei Überschreitung der Verarbeitungshinweise mit einer beschädigten Oberfläche dargestellt. Die Fehlerbilder sind über einen Relief-Filter verdeutlicht.

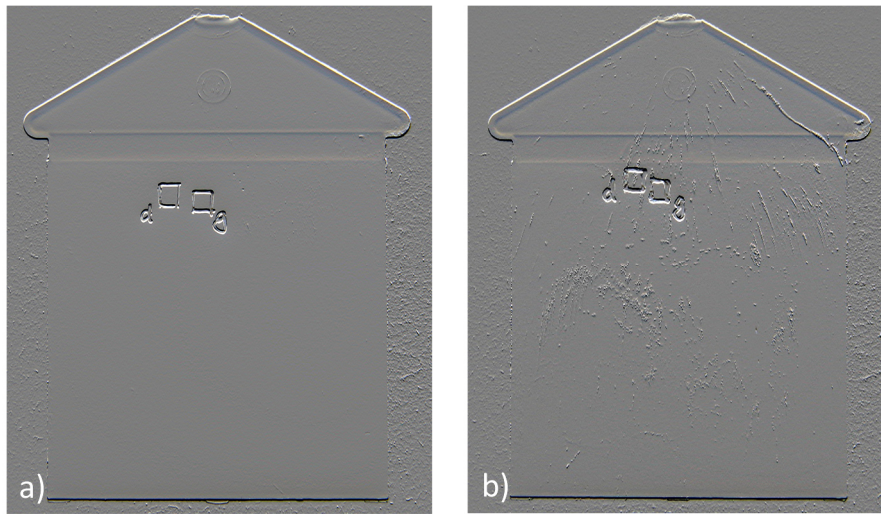


Abbildung 6-9 Einfluss hoher Restfeuchteanteile auf die Bauteiloberfläche von PA 6 bei a)  $v_{inj} = 60\text{mm/s}$ ,  $c_{H_2O} = 0,07\%$  und b)  $v_{inj} = 60\text{mm/s}$ ,  $c_{H_2O} = 0,16\%$

Die Fehlerbilder sind entsprechend der Restfeuchteanteile lokal stark unterschiedlich ausgebildet. Daher bildet nur eine Gesamtaufnahme des Bauteils die Einflussstärke der Restfeuchtigkeit ab. Um die Oberflächeneigenschaften mit einer höheren Detailschärfe zu untersuchen, werden an den markierten Bereichen konfokalmikroskopische Aufnahmen angefertigt. In den Detailansichten in Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11 zeigen sich die deutlichen Einflüsse der Restfeuchteausgasung auf die Oberfläche. In der Detailansicht in Abbildung 6-10 ist der markierte Bereich „g“ aus Abbildung 6-9a veranschaulicht. Hier sind leichte Unebenheiten auf Grund der Werkzeugmaserung und gegebenenfalls Verunreinigungen zu erkennen aber keine deutliche Beschädigung der Oberfläche. Die Detailansicht in Abbildung 6-11 zeigt den markierten Bereich „d“ aus Abbildung 6-9b. Die Probe zeigt eine defektbehaftete Oberfläche mit einer Feuchtigkeitsschliere, die zu einer Zerklüftung der Oberfläche und Beschädigung führt.

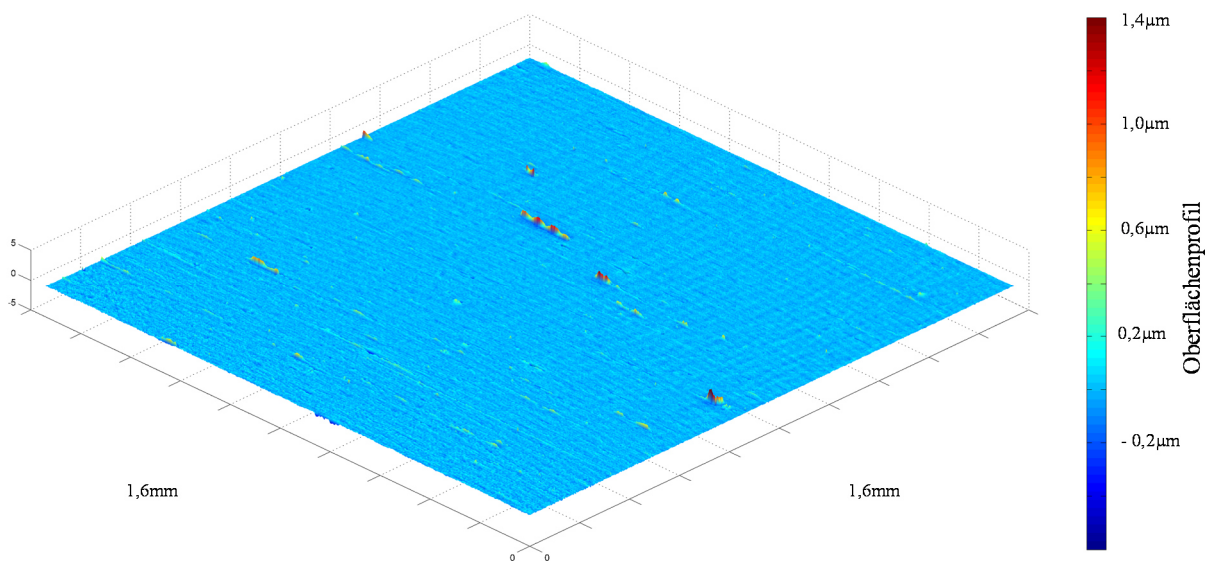


Abbildung 6-10 Detailansicht der Oberfläche mit  $v_{inj} = 60\text{mm/s}$ ,  $c_{H_2O} = 0,07\%$  ohne Defekte durch Restfeuchteinflüsse

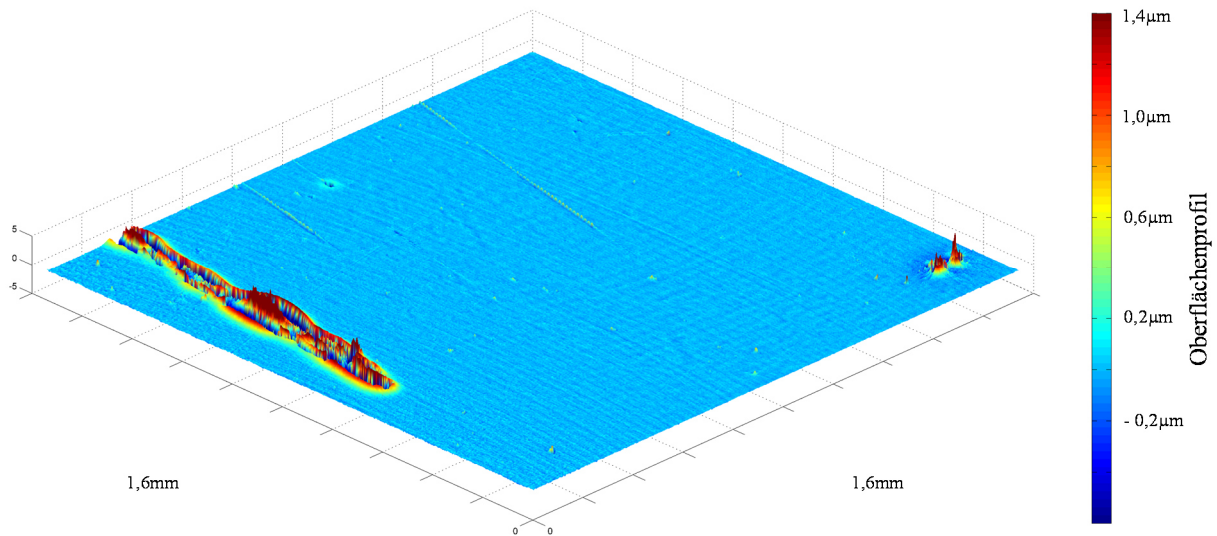


Abbildung 6-11 Detailansicht der Oberfläche mit  $v_{inj} = 60\text{mm/s}$ ,  $c_{H_2O} = 0,16\%$  mit Defekten durch Restfeuchteinflüsse

Die Art der Oberflächendefekte durch ausgasende Feuchtigkeit wurde sowohl bei den bereits dargestellten Versuchsreihen mit PA 6 festgestellt als auch bei den Versuchsreihen mit PBT. Der maximal zulässige Feuchtegehalt des PBT liegt mit  $c_{H_2O,max} = 0,02\%$  deutlich unter dem des PA 6. Innerhalb dieser Untersuchungen wurden bereits Defekte durch ausgasende Feuchtigkeit bei einer Überschreitung dieser Grenze festgestellt. In Abbildung 6-12 ist eine dreidimensionale Darstellung einer Feuchtigkeitsschliere an einem PBT Bauteil bei einem Restfeuchtegehalt von  $c_{H_2O} = 0,03\%$  abgebildet. Die Darstellung verdeutlicht den Einfluss der Restfeuchteanteile und veränderten Strömungsbedingungen im Aufbau der Oberfläche, Abbildung der Kavität sowie Ausbildung der Bauteilmorphologie.

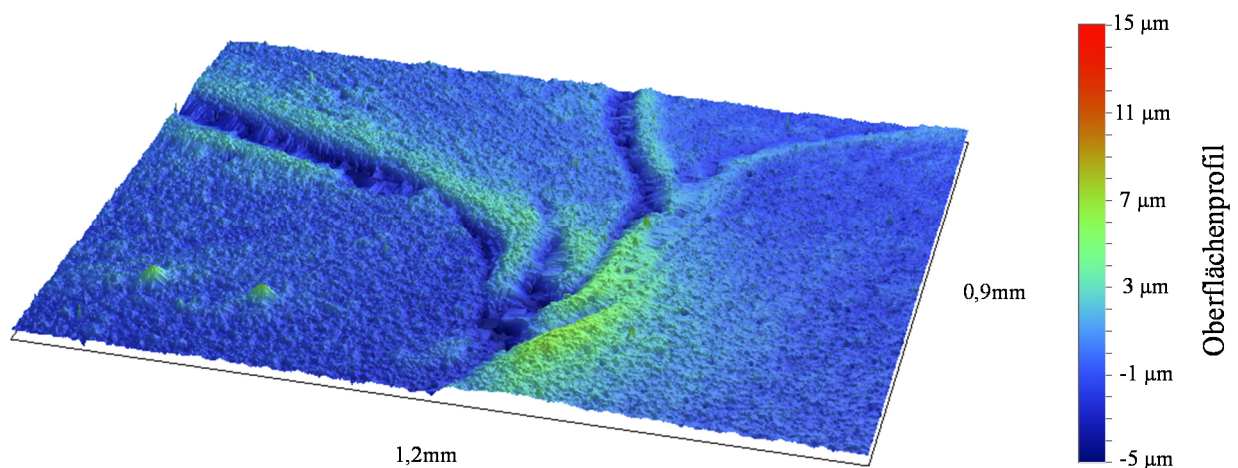


Abbildung 6-12 Weißlicht Interferometriaufnahme einer Feuchtigkeitsschliere am Beispiel von PBT mit einem Restfeuchteanteil von  $c_{H_2O} = 0,03\%$

Die Defekte durch ausgasende Feuchtigkeit hängen direkt mit den durch die Viskosität veränderten Prozessbedingungen zusammen. Durch den physikalischen Einfluss der Restfeuchteanteile auf die Struktur des Materials wird die Viskosität reduziert. Bei konventioneller Prozessführung ist hierdurch ein direkter Abfall des Massedruckes während der Einspritzphase bedingt. Durch den Druckabfall kann die in der Kunststoffmatrix gebundene Restfeuchte in der hochdynamischen Einspritzphase ausgasen und die Bauteiloberfläche beschädigen. Die Defekte entstehen durch eine Kombination aus an der Werkzeugwand kondensierter Feuchtigkeit,

einer Überströmung bereits erstarrter Bereiche und hierüber veränderten Abkühlbedingungen sowie lokaler Viskositätsunterschiede auf Grund von Diffusionsprozessen der Restfeuchte.

Auf Grund der nur repräsentativ zu betrachtenden Oberflächenqualität der Bauteile wird eine Diskussion dieses Qualitätsparameters im Anschluss an die intelligente Qualitätsregelung gesondert durchgeführt. Dabei kann in Korrelation zu dem Erklärungsansatz zur ausgasenden Restfeuchte durch veränderte Massedruckverhältnisse, die Anforderung an konstante Bedingungen in Bezug auf Massedruck und Massetemperatur berücksichtigt werden. Im Folgenden werden Anforderungen an die Qualitätsregelung auf Grund der diskutierten Einflüsse auf die Prozess- und Produktqualität sowie den Ergebnissen aus der Prozesssimulation formuliert. Anschließend werden diese Anforderungen in einem Regelkonzept umgesetzt und validiert.

### 6.3 Intelligente Qualitätsregelung

Für die Qualitätsregelung können die bereits definierten Anforderungen an die Qualitätskriterien für die Prozesskennzahlen sowie Bauteileigenschaften aus der Diskussion der Simulationsergebnisse und Prozesscharakterisierung übertragen werden. Dabei stehen insbesondere folgende Anforderungen im Fokus, die trotz Variation der Materialeigenschaften erfüllt werden müssen:

- konstantes Bauteilgewicht,
- konstante Oberflächenqualität und gleichmäßiger morphologischer Schichtaufbau ohne Feuchtigkeitseinflüsse,
- Kompensation des Schließverhaltens der Rückströmsperre,
- Kontrolle der Massetemperatur und des Massedruckes ( $pVT$ -Verhalten),
- konstanter Füllgrad in der Einspritzphase zur Vermeidung von Druckspitzen am Umschaltunkt und gleichmäßigem Übergang in die Nachdruckphase.

Um die geforderten Kriterien für die Prozessqualität zu erfüllen, wird eine adaptive Prozessführung auf Basis eines Referenzprozesses implementiert. Ausgehend von einem hinterlegten Betriebspunkt werden die notwendigen adaptiven Maßnahmen auf die geforderten Qualitätskriterien bezogen, dabei ist eine Regelung basierend auf resultierenden Prozesskennzahlen zielführend. Um die notwendigen Qualitätskriterien prozess- und anforderungsspezifisch festlegen zu können, muss ein gelernter Betriebspunkt hinterlegt werden, der alle notwendigen Anforderungen an die Prozess- und Produktqualität erfüllt. Ausgehend von dem gelernten Betriebspunkt wird die Regelung autonom eine intelligente Anpassung der Prozessparameter entsprechend der aktuellen Prozessbedingungen vornehmen. Dabei muss die Regelung in der Lage sein, Veränderungen der Prozessbedingungen zu detektieren, einen Bezug zu Einflüssen auf die Qualitätskriterien herzustellen und entsprechende adaptive Maßnahmen abzuleiten.

Die Qualitätsregelung wird in die drei folgenden Bereiche unterteilt:

- druckgeregelte, adaptive Einspritzphase,
- adaptives Umschaltkriterium,
- modellbasierte Nachdruckphase.

Die Umsetzung der Regelstrategie wird im Folgenden diskutiert. Die Vorgehensweise zur Ableitung der notwendigen Daten und Implementierung der Prozessregelung ist in Abbildung 6-13 veranschaulicht.

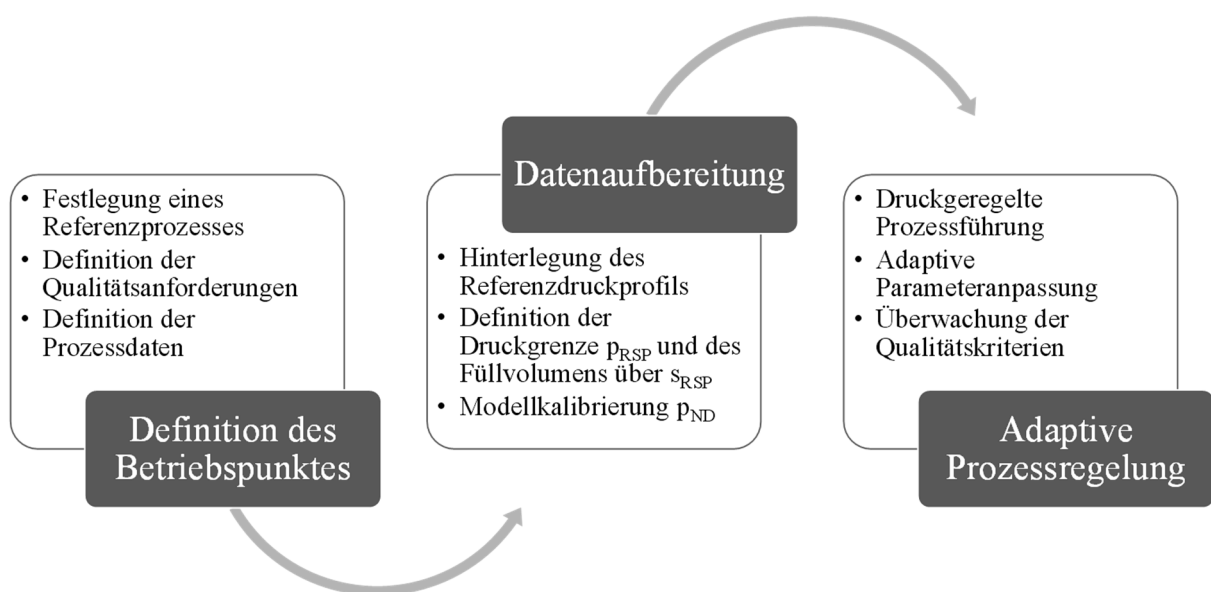


Abbildung 6-13 Schematische Darstellung zur Implementierung einer druckgeführten, adaptiven Prozessregelung auf Basis eines Referenzbetriebspunktes

Die Regelung der Einspritzphase wird anhand des gelernten Referenzbetriebspunktes kalibriert und beruht auf primären Prozessgrößen. Ausgehend von dem gelernten Betriebspunkt wird die Einspritzphase über die Sollwertvorgabe einer referenzierten Druckkurve geregelt. Die Vorgabe des Druckprofils definiert den notwendigen Volumenstrom und dient dabei als Regelgröße. Die adaptiv angepasste Stellgröße ist der bei konventioneller Prozessführung konstante Volumenstrom, respektive die Schneckenvorschubgeschwindigkeit. Das statistisch basierte Prozessmodell bezieht sich ausschließlich auf die Nachdruckphase.

### 6.3.1 Adaptive druckgeregelter Prozessführung

Zur Umsetzung der Regelung wird ein Parametersatz als referenzierter Betriebspunkt von der Anlagensteuerung bzw. der externen Softwareumgebung gelernt. Der robuste Betriebspunkt liegt innerhalb der geforderten Spezifikationen und erfüllt alle Qualitätsanforderungen an die Prozess- und Produktqualität. Eine Optimierung im Hinblick auf Zykluszeit und Energieeffizienz ist sinnvoll und vorab durchzuführen. Folgende Angaben sind als Parametersatz sowie als Prozesskennzahlen für den Betriebspunkt neben den konventionellen Einstellungen, wie dem Temperaturprofil der Zylinderzonen, zu hinterlegen:

- Einspritzphase,
  - Druckverlauf im Einspritzvorgang  $p_{inj}(t)$  entsprechend dem Massedruckprofil  $p_M(t)$ ,
  - Schneckenvorschubgeschwindigkeit  $v_{inj}(t)$ ,
  - mittlere Schneckenvorschubgeschwindigkeit  $\bar{v}_{inj}$ ,
  - Weg- / Volumengeregeltes Umschaltkriterium  $s_u$ ,
  - Referenzdruck zum Schließen der RSP  $p_{RSP}$  an einer definierter Schneckenposition  $s_{RSP}$ ,
- Nachdruckphase,
  - Druck in der Nachdruckphase  $p_{ND}(t)$ ,
- Optionale Kontrollgrößen,
  - Antriebsenergie in der Einspritzphase  $E_{inj}$ ,
  - Mittleres Antriebsmoment in der Plastifizierphase  $\bar{M}_{plast}$ ,
  - Antriebsenergie in der Plastifizierphase  $E_{plast}$ .

#### 6.3.1.1 Darstellung der Regelstrategien im Einspritzvorgang

Entsprechend der Prozessbedingungen ergibt sich der Massedruck resultierend aus der Schneckenvorschubgeschwindigkeit und der Materialviskosität. Die adaptive Druckregelung in der Einspritzphase wird über einen vorgesteuerten PID-Regler realisiert. In Abbildung 6-14 ist der Regelkreis für die Umsetzung der druckgeregelter Einspritzphase dargestellt.

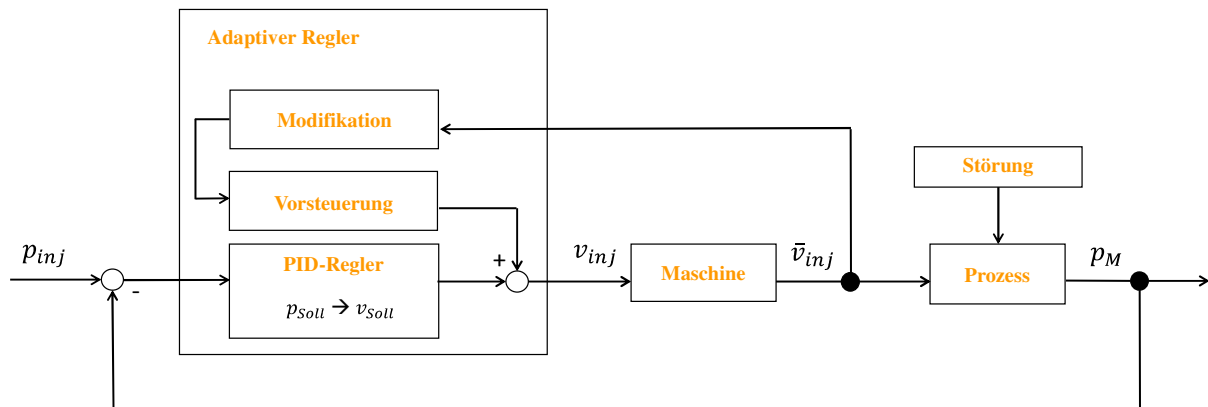


Abbildung 6-14 Schematische Darstellung des Regelkreises zur Qualitätsregelung in der Einspritzphase

Dabei ist die Führungsgröße und Sollvorgabe  $p_{inj}(t)$  aus dem Massedruckverlauf  $p_M(t)$  des Referenzprozesses abgeleitet und wird mit einer Auflösung von 500 Hz zur Verfügung gestellt. Diese wird über einen adaptiven, vorgesteuerten PID-Regler in die Stellgröße Schneckenvorschubgeschwindigkeit  $v_{inj}(t)$  umgesetzt. Diese Größe kann der Anlagensteuerung direkt vorgegeben werden und wird über die messtechnische Anbindung aus der Softwareumgebung übertragen. Die Maschine setzt das Eingangssignal entsprechend der internen Geschwindigkeitsregelung und deren Regelgenauigkeit um. Die Regelgröße Massedruck  $p_M$  wird entsprechend wieder zurückgeführt und mit der Sollvorgabe abgeglichen.

Das Reglerdesign gestaltet sich nach folgenden allgemeinen Formulierung nach Formel 6-1.

$$y(t) = K_P e(t) + K_I \int_{t_1}^{t_2} e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) + K_V$$

Formel 6-1      Vorgesteuerter PID-Regler für die Einspritzbewegung

Die Stellgröße  $y(t)$  setzt sich aus dem proportionalen, integralen und differentialen Anteil zusammen. Dabei können die Einstellparameter  $K_P$ ,  $K_I$  und  $K_D$  entsprechend des Systemverhaltens angepasst werden. Der Wert der Vorsteuerung  $K_V$  wird als weiterer Anteil addiert. Durch dieses Reglerdesign wird direkt ein Niveau für die Schneckenvorschubgeschwindigkeit durch den Vorsteuerwert vorgegeben, der PID-Regler greift nur zum Ausgleich bei auftretenden Sollwertabweichungen ein. Dieses Vorgehen ist insbesondere bei konstanten oder in Profilstufen hinterlegten Stellgrößen sinnvoll. Durch die adaptive kontinuierliche Modifikation des Vorsteueranteils werden die notwendigen Regeleingriffe des PID-Reglers auf ein Minimum reduziert. Der Parameter zur Vorsteuerung des Reglers  $K_V$  wird direkt an die Prozessbedingungen adaptiert. Die Vorteile einer Vorsteuerung sind ein schnelles Ansprech- und verbessertes Führungsverhalten ohne Gefährdung der Stabilität. Insbesondere durch die Vorgabe eines zeitlichen Verlaufs der Sollgröße mit zu Beginn hohen Unterschieden im Sollgrößenprofil ist eine hohe Reaktionsschnelligkeit des Reglers notwendig. Die Stärke des Regeleingriffes wird durch die adaptive Vorsteuerung minimiert und darüber die Systemstabilität deutlich erhöht. Die Einstellparameter wurden mittels Sprungantwort sowie experimenteller Anpassung kalibriert. Die Parametereinstellungen sind dem Anhang zu entnehmen. Durch die adaptive Vorgabe des Vorsteuerwertes wird der Regler direkt in Bezug auf die aktuellen Prozessbedingungen hin optimiert. Dies wirkt sich zum einen positiv auf die Regelgenauigkeit zum anderen positiv auf die Robustheit des Gesamtsystems aus. Insbesondere zu Beginn der Einspritzphase sind ein schnelles Ansprechverhalten sowie eine sehr genaue Ausregelung von Abweichungen innerhalb der hochdynamischen Einspritzbewegung essentiell.

Die Vorsteuerung wird im ersten Schritt durch die hinterlegte Schneckenvorschubgeschwindigkeit definiert. Im weiteren Verlauf findet eine prozessadaptive Modifikation der Vorsteuerung entsprechend der notwendigen Schneckenvorschubgeschwindigkeit zur Umsetzung der Führungsgröße statt. Die Vorsteuerung wird adaptiv vor jeder Einspritzphase an die im vorherigen Zyklus vorliegende mittlere Schneckenvorschubgeschwindigkeit  $\bar{v}_{inj}$  angepasst. Hieraus resultiert eine hohe Regelgenauigkeit und spezifische Adaption des Reglers an die aktuellen Prozessbedingungen. Da ein Wechsel der Materialeigenschaften über mehrere Zyklen kontinuierlich über einen im Vergleich zur Einspritzzeit langen Zeitraum stattfindet, ist eine Modifikation von Zyklus zu Zyklus ausreichend. Auf die Definition der mittleren Schneckenvorschubgeschwindigkeit und Festlegung der notwendigen Intervallgrenzen wird im Weiteren detailliert eingegangen.

Insbesondere das schnelle Ansprechverhalten zu Beginn der Einspritzbewegung machen weitere Modifikationen des Reglers neben der Vorgabe der adaptiven Vorsteuergeschwindigkeit notwendig. Um Einflüsse aus dem starken Beschleunigungsprozess zu Beginn der Einspritzphase sowie aus dem Schließverhalten der RSP auf den Regler auszuschließen, wird die Einspritzphase in zwei Bereiche unterteilt. Zu Beginn des Einspritzprozesses kommt es abhängig vom Schließverhalten der RSP zu einem kurzzeitig starken Druckanstieg, der allerdings mit Bezug zur Einspritzzeit oder der Schneckenposition variieren kann. Zu Beginn der Einspritzphase wird lediglich eine Steuerung anhand des Vorsteuerwertes vorgenommen. Dies verhindert, dass durch



die großen resultierenden Unterschiede im Soll- und Istwert zu Beginn des Prozesses das Regelverhalten beeinflusst wird und die Reaktionsgeschwindigkeit des Reglers über das integrale Glied für den weiteren Prozessverlauf erhalten bleibt. In der zweiten Phase der Einspritzbewegung wird die Vorsteuerung durch den PID-Regler überlagert. Der PID-Regler gleicht dann die, durch die Optimierung der Vorsteuerung minimierten, Unterschiede im Soll- und Istwert aus. In Abbildung 6-15a ist die Unterteilung einer Referenzdruckkurve für die Regelung dargestellt.

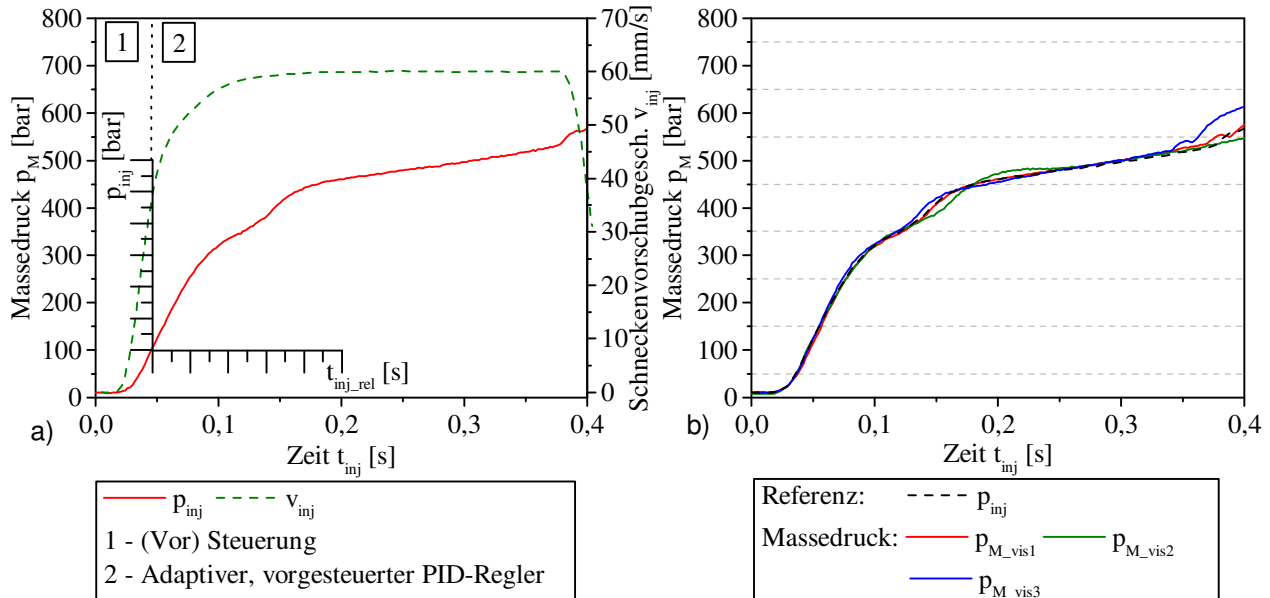


Abbildung 6-15 a) Darstellung der Bereiche zur Regelung des Einspritzdruckprofils  
 b) Reproduzierung des Referenzdruckprofils  $p_{inj}(t)$  bei verschiedenen Viskositäten (vis1-3)

Im ersten markierten Bereich wird der Beschleunigungsprozess zu Beginn der Einspritzbewegung durch die Steuerung anhand des adaptiven Vorsteuerwertes umgesetzt. Die Phasengrenze wird durch einen Druck von  $p_{RSP} = 100 \text{ bar}$  definiert, bei der von einer geschlossenen Rückströmsperre ausgegangen werden kann. In der zweiten Phase der Regelung der Einspritzbewegung wird das Druckprofil unter Verwendung von relativen Achsen, bezogen auf das Schließen der RSP und damit auf den Zeitpunkt bei Erreichen der Druckgrenze, reproduziert. Differenzen zum Referenzbetriebspunkt werden durch Adaption der relativen Zeitachse kompensiert. Somit ist der Druckverlauf unabhängig vom Schließverhalten der RSP und von Beschleunigungsprozessen. Eine zeitliche Reproduzierung des Druckverlaufes findet nicht statt, dafür wird eine sehr hohe Genauigkeit der Bewegung in Bezug auf das Füllverhalten erzielt. Abbildung 6-15b zeigt die Funktionsweise der Regelung anhand eines Referenzdruckprofils und dem Verlauf von drei geregelten Druckkurven aus Zyklen mit unterschiedlicher Viskosität. Die minimalen Abweichungen von dem hinterlegten Profil sind auf die unterschiedlichen Füllzeiten bedingt durch die adaptive Schneckenvorschubgeschwindigkeit, das Schließverhalten der RSP sowie den adaptiven Umschaltvorgang zurückzuführen. Innerhalb der Validierung wird ein umfassender Vergleich der Druckkurven bei unterschiedlichen Viskositäten durchgeführt.

Entsprechend der Sollwertvorgabe des Massedrucks wird die Schneckenvorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Viskosität angepasst und das Referenzdruckprofil reproduziert. Um innerhalb der Regelung die notwendigen Eingriffe des PID-Reglers zu minimieren, wird die Vorsteuerung adaptiv entsprechend der aktuellen Prozessbedingungen modifiziert. Innerhalb eines Intervalls gleichmäßiger Füllung der Kavität wird die mittlere Einspritzgeschwindigkeit des aktuellen Zyklus gebildet. Das Intervall ist entsprechend so zu wählen, dass eine Modifikation des Umschaltkriteriums sowie die Einspritzzeit keinen Einfluss auf das Intervall haben. Für eine autonome Bestimmung der Intervallgrenzen ist der Abschluss der Beschleunigungsphase bis zum Einsetzen der Bremsbewegung am Umschaltpunkt heranzuziehen. In Abbildung 6-16 ist die Schneckenvorschubgeschwindigkeit, angepasst durch die adaptive Regelung entsprechend der Viskosität, einschließlich des

Intervalls von  $t_1$  bis  $t_2$  zur Bildung der mittleren Schneckenvorschubgeschwindigkeit dargestellt. Die Variation der Einspritzzeit auf Grund der adaptiven Einspritzgeschwindigkeit ist deutlich zu erkennen.

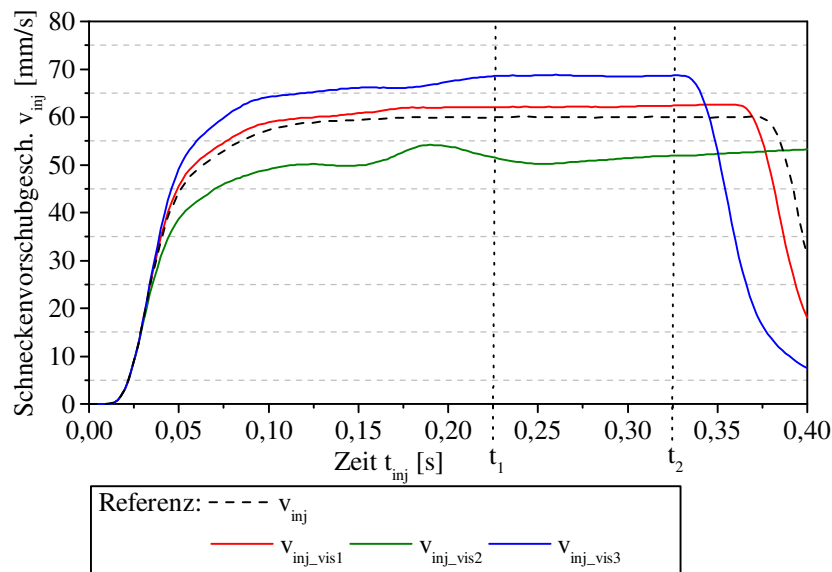


Abbildung 6-16 Bildung der mittleren Einspritzgeschwindigkeit zur adaptiven Vorsteuerung

Die mittlere Einspritzgeschwindigkeit wird als Vorsteuergeschwindigkeit für den folgenden Zyklus vorgegeben. Auf Grund der Geometrie des verwendeten Werkzeuges ist in diesem Fall lediglich eine Vorsteuerungsstufe notwendig. Die ermittelte mittlere Geschwindigkeit entspricht der nahezu konstanten notwendigen Geschwindigkeit um die beiden Plattenhälften kontinuierlich zu füllen. Die entsprechend der Viskosität und der Einspritzregelung resultierenden, signifikanten Geschwindigkeitsniveaus innerhalb der Füllphase sind in Abbildung 6-16 beispielhaft abgebildet. Bei einer komplexeren Werkzeuggeometrie ist eine Modifikation des Reglerdesigns entsprechend der Fließwege notwendig. Wird ein Schneckenvorschubgeschwindigkeitsprofil mit mehreren Stufen zur Füllung des Werkzeuges benötigt, so ist entsprechend jedes Bereiches eine Vorsteuerungsstufe anzugeben und prozessadaptiv zu modifizieren. Auf diese Weise wird für jede Phase der Werkzeugfüllung eine prozessadaptive, optimale Vorsteuerung erzielt, die mit minimalen Regeleingriffen im Verlauf der Einspritzbewegung das Referenzdruckprofil reproduzieren kann.

Eine detaillierte Diskussion der mittleren Einspritzgeschwindigkeit, deren charakteristischer Verlauf entsprechend der Prozessbedingungen sowie eine Nutzung dieser Kennzahl für weitere adaptive Maßnahmen werden in den folgenden Kapiteln diskutiert. Die Korrelation zu den in Kapitel 6.2 vorgestellten konventionellen Kennzahlen zur Prozesscharakterisierung wird ebenfalls abgebildet.

### 6.3.1.2 Adaptive Definition des Umschaltkriteriums

Ein weiterer Anforderungspunkt neben der Konstanz im Druck- und Temperaturprofil in der Formfüllung ist eine vollständige und gleichmäßige Füllung der Kavität am Umschaltpunkt. Das bis zum Umschaltpunkt in die Kavität verdrängte Schmelzevolumen wird neben den Prozessbedingungen maßgeblich durch das Schließverhalten der RSP bestimmt. Daher ist eine adaptive Definition des Umschaltpunktes unter Berücksichtigung der Prozessbedingungen und dem Schneckenweg bis zum Schließen der RSP notwendig.

Ausgehend von der vorgestellten Regelung der Einspritzbewegung und des referenzierten Betriebspunktes ist das notwendige Volumen und demnach der Schneckenweg bis zur Position  $s_u$  als Umschaltkriterium bekannt. Des Weiteren ist der notwendige Schneckenweg bis zur Position  $s_{RSP}$  bis zur definierten Druckgrenze  $p_{RSP}$  zur Bildung einer Volumenbilanz in der Einspritzphase definiert. Ausgehend von den Referenzgrößen und dem aktuellen Schneckenweg bis zur definierten Druckgrenze wird der Umschaltpunkt des aktuellen Zyklus für eine konstante Volumenbilanz modifiziert. Kompressionseffekte der Schmelze werden über das konstante Druckprofil in der Einspritzbewegung berücksichtigt.



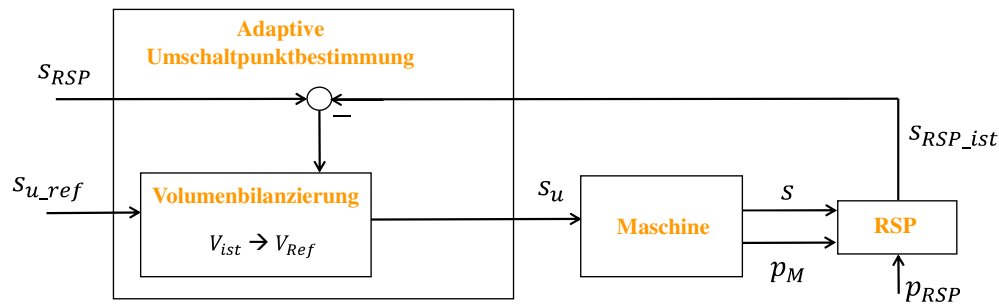


Abbildung 6-17 Adaptive Umschaltpunktbestimmung für eine konstante Volumenbilanz in der Formfüllung

In Abbildung 6-17 ist die Bestimmung des Umschaltkriteriums entsprechend der aktuellen Prozessbedingungen und der hinterlegten Volumenbilanz dargestellt. Auf diese Weise wird ein konstantes in die Kavität verdrängtes Volumen in der Einspritzphase sichergestellt.

### 6.3.1.3 Modellgestützte Nachdruckadaption

Auf Grund der vorgestellten Prozessregelung werden die Konstanz des  $pvT$ -Verhaltens am Umschaltpunkt sowie die Einhaltung der Volumenbilanz des verdrängten Materials deutlich verbessert. Dies unterstützen die Detailbetrachtungen der Werteverläufe aus der Prozesssimulation. Um auch in der Nachdruckphase die Qualitätskriterien positiv zu beeinflussen, ist insbesondere das Schwindungsverhalten und die Kompensation über einen bei konventioneller Prozessführung konstantes Massedruckprofil zu berücksichtigen. Auf Grund der Viskositätsunterschiede und dem darüber veränderten Druckübertragungsverhalten in die Kavität, resultieren bei Viskositätsschwankungen bei konstantem Nachdruckniveau Schwankungen im Bauteilgewicht.

Im Folgenden wird eine autonome, modellgestützte Adaption der Nachdruckhöhe auf Basis eines statistischen Prozessmodells integriert. Dabei ermöglicht die neuartige Prozessregelung in der Einspritzphase eine detaillierte Charakterisierung des aktuellen Prozesszustandes. Auf Grund der möglichen Störeinflüsse auf Kennzahlen aus der Plastifizierungsphase, die bereits bei der Darstellung der Prozesscharakterisierung in Kapitel 6.2 diskutiert worden sind, ist eine Führungsgröße aus der Phase der Formfüllung bei aktiver Prozessregelung zu bevorzugen. Diese darf in ihrem Verhalten durch die Prozessregelung allerdings nur entsprechend der Viskositätsvariationen beeinflusst werden.

Die Korrelation zwischen der Nachdruckhöhe, der Materialviskosität und dem Bauteilgewicht wird in der folgenden Abbildung für einen Beispielprozess verdeutlicht. Dabei ist jeweils das mittlere Bauteilgewicht aus zehn Zyklen bei ansonsten konstanten Prozessbedingungen dargestellt.

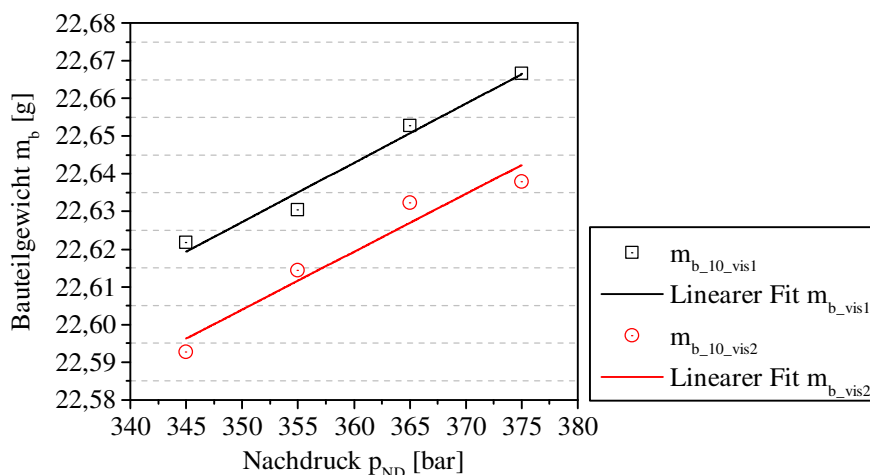


Abbildung 6-18 Korrelation zwischen Nachdruckhöhe, der Materialviskosität (vis1-2) und dem Bauteilgewicht für einen Beispielprozess mit PA 6

Die Materialviskosität des analysierten PA 6 wurde über den Restfeuchtegehalt variiert. Um eine Konstanz des Bauteilgewichtes bei Schwankungen der Materialviskosität zu gewährleisten, muss neben der adaptiven Einspritzregelung zusätzlich die Nachdruckphase prozessadaptiv geregelt werden. Dies wird über ein statistisches Prozessmodell und eine adaptive Nachdruckhöhe erzielt. Das Prozessmodell wird dabei auf die Prozessregelung in der Einspritzphase und die adaptiven Maßnahmen entsprechend der aktuellen Material- und Prozesssituation referenziert. Die notwendige Geschwindigkeit zur Reproduzierung des Referenzdruckprofils in der Einspritzphase korreliert direkt mit den über die Materialeigenschaften beeinflussten Prozessbedingungen und der Materialviskosität. Die Regeleingriffe und die resultierende, signifikante Geschwindigkeitsanpassung in der Einspritzphase beschreiben die aktuellen Prozessbedingungen, anhand derer der Nachdruck angepasst werden muss.

An dieser Stelle muss für die Kalibrierung des Prozessmodells der Validierung und detaillierten Charakterisierung der Prozessregelung und dem zur Materialviskosität signifikanten Verlauf der mittleren Schnecken-vorschubgeschwindigkeit vorweggegriffen werden. Eine detaillierte Diskussion der Verläufe und des Verhaltens der neuen Kennzahl zur Prozesscharakterisierung in den Übergangsbereichen wird in Kapitel 6.4 innerhalb der Validierung vorgenommen. Anhand eines Beispielprozesses mit einem Viskositätswechsel ist in Abbildung 6-19 der Verlauf der konventionellen Prozesskennzahlen  $\bar{M}_{plast}$  und  $E_{plast}$  aus der Plastifizierung im Vergleich zur mittleren Schnecken-vorschubgeschwindigkeit  $\bar{v}_{inj}$  als Reaktion der Prozessregelung dargestellt. Dabei ist jeweils der Mittelwert aus zehn Zyklen zusammengefasst abgebildet.

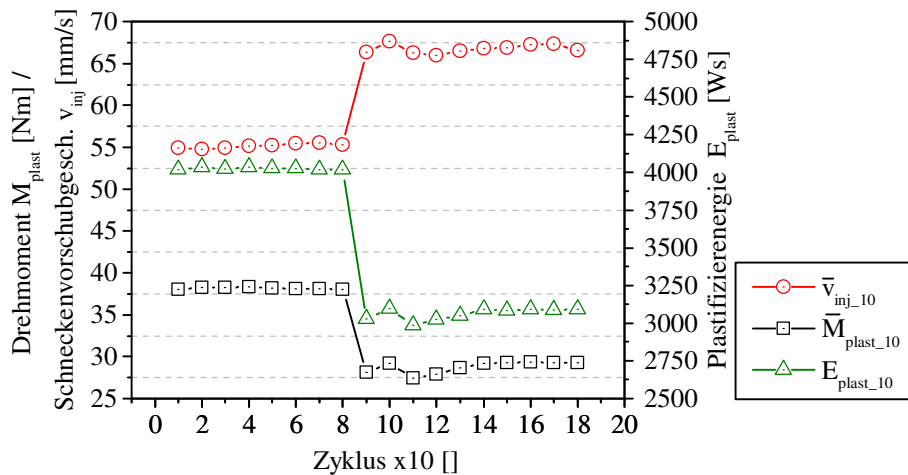


Abbildung 6-19 Korrelation der Prozesskennzahlen mit der Viskositätsänderung und dem Eingriff der Prozessregelung in der Einspritzphase für einen Beispielprozess (PA 6)

Die Prozesskennzahl der mittleren Schnecken-vorschubgeschwindigkeit zeigt eine eindeutige Signifikanz zum Materialwechsel. Verglichen mit den bereits in Kapitel 6.2.2 vorgestellten Kennzahlen zur Prozesscharakterisierung ist die durch die neuartige Regelung verfügbare Kennzahl  $\bar{v}_{inj}$  sehr gut zur Identifizierung von Prozessschwankungen geeignet. Ausgehend von der Korrelation zwischen Viskositätsschwankungen, der Nachdruckhöhe und dem Bauteilgewicht sowie der Abbildung der veränderten Prozesssituation durch die mittlere Schnecken-vorschubgeschwindigkeit, kann ein statistisches Prozessmodell zur Adaption der Nachdruckhöhe aufgestellt werden.

Das statistische Prozessmodell wird nach folgender Formulierung entsprechend der Prozessbedingungen, Qualitätskriterien und der adaptiven Einspritzgeschwindigkeit linear abgebildet.

$$p_{ND}(\bar{v}_{inj}) = p_{ND} + K_{pND} \cdot \left(1 - \frac{\bar{v}_{inj}}{\bar{v}_{inj\_Ref}}\right)$$

Formel 6-2 Reglerdesign zur prozessadaptiven Regelung der Nachdruckhöhe

Die Kalibrierung des Modells ist entsprechend der Zielkriterien und der aktuellen Prozesseinstellungen anhand der referenzierten Nachdruckhöhe  $p_{ND}$  und mittleren Schneckenanschubgeschwindigkeit  $\bar{v}_{inj\_Ref}$  sowie dem spezifischen Kalibrierungsfaktor  $K_{pND}$ , über den die Eingriffsintensität festgelegt wird, durchzuführen. Des Weiteren ist die Kennzahl  $\bar{v}_{inj}$  unabhängig von der Adaption in der Nachdruckphase und daher für eine unabhängige Regelung besonders geeignet. Dies kann insbesondere bei der Plastifizierenergie bei hohen Schussgewichten, langen Nachdruckzeiten und einer großen Anpassungsbandbreite der Nachdruckhöhe nicht gewährleistet werden. In diesem Fall würde die Adaption direkt auch einen Einfluss auf die Detektionsgröße haben und wiederum die Reaktion des Reglers beeinflussen. Aus diesem Grund ist die vorgestellte Prozesskennzahl  $\bar{v}_{inj}$  für die Regelung heranzuziehen.

## 6.4 Experimentelle Validierung

Die dargestellte Prozessregelung wird mit den drei vorgestellten Bereichen in der Softwareumgebung umgesetzt und anhand eines Referenzprozesses kalibriert. Der hinterlegte Betriebspunkt ist innerhalb der material-spezifischen Spezifikationen für das untersuchte PA 6 mit einem Restfeuchteanteil von  $c_{H_2O} = 0,07\%$  und erfüllt alle Qualitätskriterien. Innerhalb der Spezifikationen treten keine Oberflächendefekte durch Ausgasung von Restfeuchte auf. Die wichtigsten Prozessparameter des Referenzbetriebspunktes sind in Tabelle 6-4 zusammengestellt. Das resultierende Referenzdruckprofil ist bereits in Abbildung 6-15 mit den definierten Druckgrenzen dargestellt worden.

Tabelle 6-4 Prozessparameter des Referenzbetriebspunktes

Parameter	
$v_{inj}$ [mm/s]	60
$s_u$ [mm]	5,9
$p_{ND}$ [bar]	355
$t_{ND}$ [s]	13
$c_{H_2O}$ [%]	0,07

Die Kalibrierung anhand des Referenzbetriebspunktes wurde vorab in einem gesonderten Versuch durchgeführt. Die Konditionierungsstufe des hinterlegten Betriebspunktes wird innerhalb des Versuchsplans zur Validierung und Darstellung der Reproduzierbarkeit integriert. In Tabelle 6-5 sind die Konditionierungsstufen der Versuchsreihe zusammengefasst und in der Reihenfolge im Versuchsplan angegeben.

Tabelle 6-5 Konditionierungsstufen der Materialrestfeuchte zur Validierung der Prozessregelung

Parameter	
$c_{H_2O}$ [%]	0,03; 0,05; 0,07; 0,12; 0,15; 0,10

Die Konditionierungsstufen wurden innerhalb eines konstanten Zyklusbetriebes dem Prozess über den Materialtrichter zugeführt, ohne den Produktionsprozess zu unterbrechen. Die Prozessregelung ist während der Versuchsreihe in allen Prozessbereichen aktiviert. Um direkt den Vergleich zur konventionellen Prozessführung darstellen zu können, wurde die Prozessführung kurzzeitig innerhalb der Konditionierungsstufen auf die konventionelle Prozessregelung umgeschaltet. Hierbei wurde zuerst die Nachdruckregelung deaktiviert, anschließend die Regelung der Einspritzphase.

### 6.4.1 Validierung der Regelung der Einspritzbewegung

Die neuartige Prozessregelung während der Einspritzphase soll anhand einer prozessadaptiven Schneckenvor-schubgeschwindigkeit das referenzierte Druckprofil reproduzieren. Die Viskositätsunterschiede durch die Veränderung der Materialkonditionierung führen bei konventioneller Prozessführung zu einer Veränderung des Massedruckes. Dies wird durch die Prozessregelung kompensiert. Die Funktionalität der Prozessregelung wird in Abbildung 6-20 für die unterschiedlichen Materialkonditionierungsstufen anhand repräsentativer Beispi-elzyklen dargestellt.

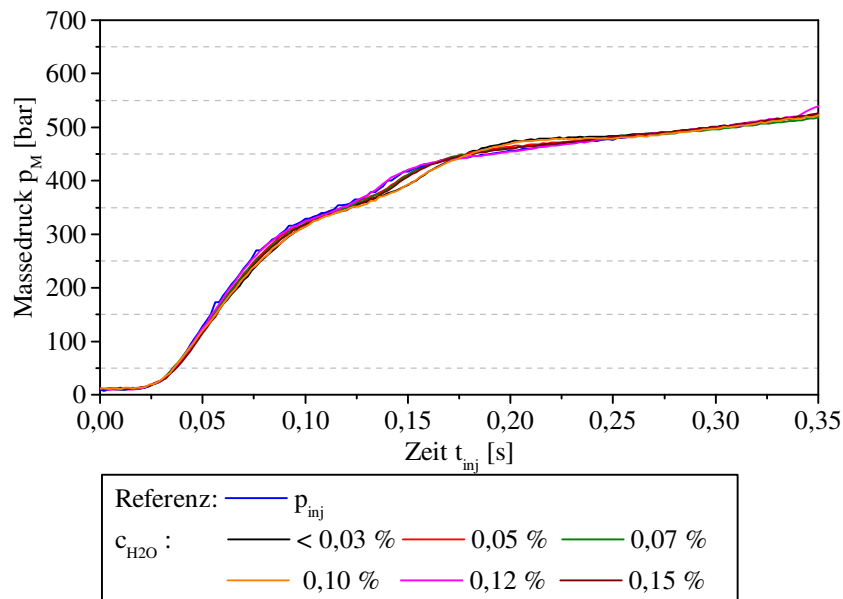


Abbildung 6-20 Validierung der Regelung des Einspritzdruckprofils anhand repräsentativer Beispielzyklen unterschiedlicher Viskosität am Beispiel von PA 6

Trotz der großen Viskositätsunterschiede durch die Restfeuchtevariationen, kann die Referenzdruckkurve durch die Regelung mit hoher Genauigkeit reproduziert werden. Die Auswirkungen der Prozessregelung zeigen sich im direkten Vergleich der resultierenden Massedruckverläufe während des Versuchsverlaufes mit konventioneller und druckgeführter Prozessregelung. In Abbildung 6-21 sind die Druckverläufe des Massedruckes während der Einspritzphase für alle Zyklen der Versuchsreihe mit konventioneller Prozessführung (Abbildung 6-21a) sowie mit aktivierter Prozessregelung (Abbildung 6-21b) dargestellt. Dies schließt die Übergangsbereiche bei Materialwechseln mit ein, die insbesondere durch eine kontinuierliche Adaption der Regelung die Funktionsfähigkeit des Regelkonzeptes validieren.

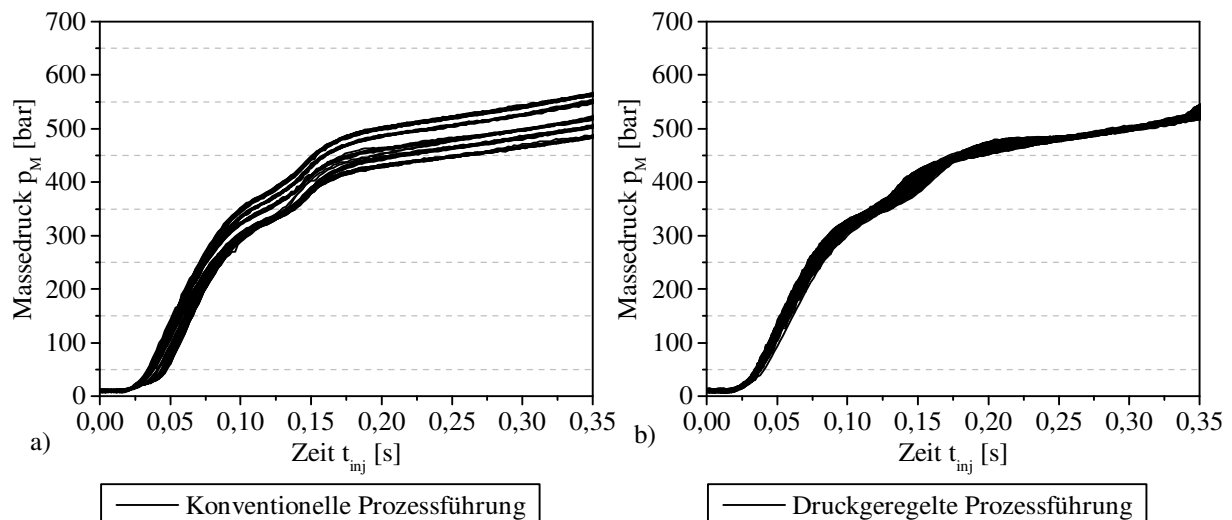


Abbildung 6-21 Darstellung des resultierenden Massedruckprofils in der Einspritzphase bei Variation der Materialviskosität mit a) konventioneller Prozessführung und b) druckgeregelter Prozessführung

Die Druckunterschiede im Massedruck bei konventioneller Prozessführung sind bereits hinreichend diskutiert worden und zeigen die große Bandbreite der Viskositätsvariationen und Prozesseinflüsse, die innerhalb der Versuchsreihe abgedeckt wird. Die resultierenden Druckprofile können direkt den Konditionierungsstufen zugeordnet werden. Dabei sinkt der resultierende Massedruck bei einer konstanten Schneckenanschubgeschwindigkeit entsprechend mit niedrigeren Viskositäten.

Die sehr gute Funktionalität der Prozessregelung wurde bereits durch Beispielzyklen angedeutet und zeigt sich auch in der Betrachtung des gesamten Versuchsraums. Wie bereits entsprechend der Simulationsergebnisse zu erwarten, werden die Massedruckunterschiede durch die neuartige Prozessregelung deutlich reduziert. Muss bei konventioneller Prozessführung bei Viskositätsänderung noch mit hohen Druckunterschieden während des Formfüllvorgangs und am Umschaltpunkt gerechnet werden, so können diese abhängig vom Zeitpunkt des Erreichens der volumetrischen Füllung durch die Prozessregelung auf ein Minimum reduziert werden. Die in Abbildung 6-21b auftretenden Druckunterschiede sind auf die kontinuierliche Anpassung der Vorsteuergeschwindigkeit in den Übergangsbereichen sowie auf die Betrachtung der Druckprofile mit auf den Startzeitpunkt der Einspritzphase bezogene Zeitachse zurückzuführen. Durch die Detektion des Schließverhaltens der RSP wird die Zeitachse der Solldruckprofile für jeden Zyklus individuell definiert und führt daher zu geringen Druckunterschieden in der Betrachtung mit einer Zeitachsen, die den Startzeitpunkt der Einspritzbewegung ohne Berücksichtigung der RSP zu Grunde legt. Hinzu kommen Unterschiede im Zeitverhalten des Füllvorgangs durch die Unterschiede in den Schneckenverschubgeschwindigkeiten. Allerdings zeigt die Regelung durch die Erhöhung der Vorsteuergeschwindigkeit bei sinkender Viskosität einen deutlich positiven Effekt auf das Schließverhalten der Rückströmsperre. Die Variation zum Zeitpunkt des Druckanstieges zu Beginn der Einspritzbewegung wird im Vergleich zur konventionellen Prozessführung deutlich reduziert.

Innerhalb der Füllphase werden über der Einspritzzeit die Druckunterschiede bei konstanten Fließwegen kompensiert. Die Eingriffsintensität der Prozessregelung und darüber die Variationsbreite der kompensierten Viskositätsunterschiede zeigen sich bei der Betrachtung der mittleren Schneckenverschubgeschwindigkeit. In Abbildung 6-22 ist die Entwicklung der mittleren Schneckenverschubgeschwindigkeit über der Versuchsdurchführung abgebildet. Dabei sind der charakteristische Verlauf der neuen Prozesskennzahl  $\bar{v}_{inj}$  bei aktiver Regelung sowie die Bereiche reproduzierter Geschwindigkeitsvorgaben bei konventioneller Prozessregelung deutlich zu differenzieren. Die dargestellte Übersicht zum Verlauf der mittleren Schneckenverschubgeschwindigkeit bestätigt die bereits vorweggenommene Korrelation zwischen der Materialviskosität und der resultierenden Geschwindigkeitsanpassung zur Regelung des Referenzdruckprofils sowie die Ergebnisse der Prozesssimulation. Im Bereich des Referenzprozesses mit  $c_{H_2O} = 0,07\%$  ergibt sich sowohl bei druckgeführter Prozessregelung als auch bei konventioneller Prozessführung eine mittlere Schneckenverschubgeschwindigkeit von  $\bar{v}_{inj}=60\text{mm/s}$ . Der vorgegebene Betriebspunkt kann demzufolge bei vorheriger Kalibrierung und Referenzierung der Regelung wieder innerhalb einer neuen Versuchsreihe reproduzierbar angefahren werden.

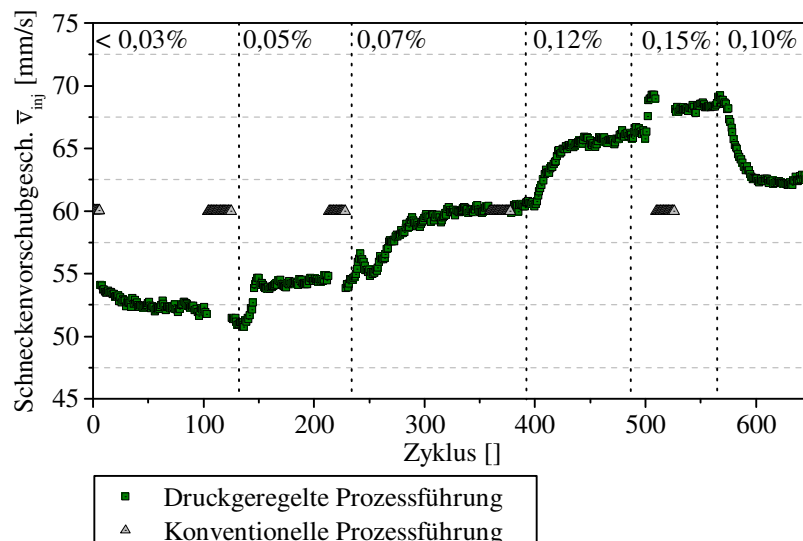


Abbildung 6-22 Verlauf der mittleren Schneckenverschubgeschwindigkeit bei Variation der Viskosität über die Materialkonditionierung

Abgeleitet aus der Diskussion der Simulationsergebnisse sind für die Einspritzphase die Qualitätskriterien einer konstanten Massetemperatur sowie eines konstanten Massedruckes definiert. Dabei korreliert nach der

Diskussion der Simulationsergebnisse eine konstant eingebrachte Einspritzenergie mit einem konstanten Massetemperaturprofil. Zum einen soll ein gleichmäßiges  $pvt$ -Verhalten am Umschaltunkt erzielt werden, zum anderen soll die Morphologieausbildung während der Einspritzphase durch konstante Druck- und Temperaturbedingungen unterstützt werden. Die Konstanz im Druckprofil wird durch die Prozessregelung, wie bereits diskutiert, sichergestellt. Die Massetemperatur wird aus der eingebrachten Antriebsenergie abgeleitet, welche in Abbildung 6-23 für die Validierungsversuchsreihe abgebildet ist.

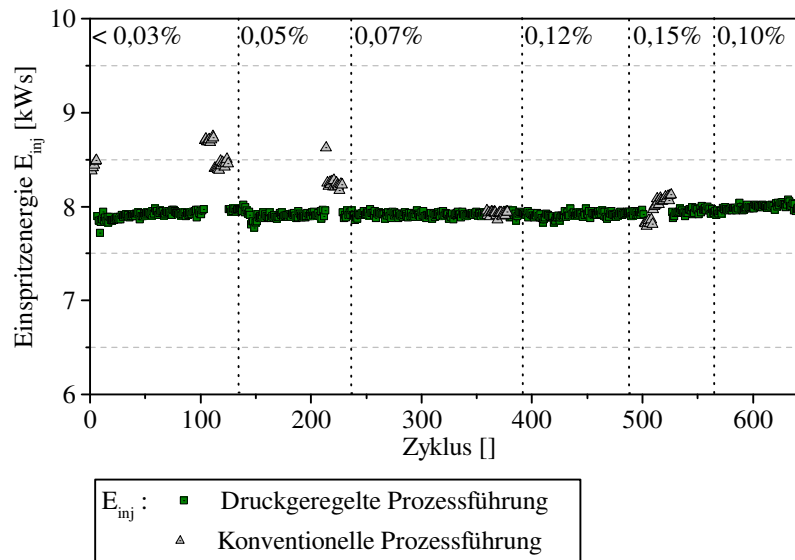


Abbildung 6-23 Verlauf der eingebrachten Antriebsenergie in der Einspritzphase bei Variation der Materialkonditionierung  $c_{H_2O}$  bei druck geregelter und konventioneller Prozessführung

Der Einfluss der Prozessregelung sowie die Ansätze des Einflusses der Viskositätsänderung bei konventioneller Prozessführung sind im direkten Vergleich differenzierbar. In Bereichen mit konventioneller Prozessführung führen die Viskositätsschwankungen zu Variationen in der eingebrachten Antriebsenergie und hierüber zu Qualitätseinflüssen. Diese sind auf Grund der geringen Zyklusanzahl konventioneller Prozessführung innerhalb der Versuchsreihe nur in Ansätzen erfasst. Eine vollständige Ausprägung der Einflüsse stellt sich erst bei größerer Datenbasis bei konventioneller Prozessführung ein. Da dies bei großen Viskositätsvariationen die Prozessstabilität gefährdet, wurde innerhalb der Versuchsreihe lediglich kurzzeitig die Regelung deaktiviert. Über der gesamten Versuchsreihe ist bei aktivierter Prozessregelung eine hohe Konstanz in der eingebrachten Antriebsenergie entsprechend der Druckregelung festzustellen. In Korrelation zu den Simulationsergebnissen leitet sich hieraus ein konstantes Massetemperaturprofil in der Einspritzphase und demnach auch maximale Massetemperatur innerhalb eines Zyklus ab. Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass über die vorgestellte Prozessregelung die Qualitätskriterien in Bezug auf die Prozessqualität erfüllt werden.

#### 6.4.2 Validierung der adaptiven Umschaltpunktberechnung

Die Betrachtung der adaptiven Umschaltpunktanpassung wird am Beispiel des Materialkonditionierungswechsels von der Referenzstufe mit einem Restfeuchteanteil von  $c_{H_2O} = 0,07\%$  auf die Materialkonditionierungsstufe mit einem Restfeuchteanteil von  $c_{H_2O} = 0,12\%$  durchgeführt. Die Rückströmsperre schließt entsprechend der geringeren Viskosität bei höheren Restfeuchteanteilen später und es kommt zu einem verzögerten Druckaufbau sowie zu Schwankungen im Füllvolumen bei konventioneller Prozessführung. Dies wirkt sich auch, wie in Kapitel 6.2.2 dargestellt, auf den Massedruck am Umschaltunkt sowie den maximalen Massedruck innerhalb eines Zyklus aus.

In Abbildung 6-24 ist der Schneckenweg bis zum Erreichen der Druckgrenze für den Materialwechsel dargestellt. Dabei ist der Übergangsbereich sowie der Einfluss der veränderten Viskosität auf das Schließverhalten der RSP in einem Einfluss auf den notwendigen Schneckenweg bis zur Position  $s_{RSP}$  bis zum Erreichen der

Druckgrenze  $p_{RSP}$  zu erkennen. Bei geringerer Viskosität wird die Druckgrenze nach einem längeren Schneckenweg erreicht. Bei konventioneller Prozessführung führt dies zu Variationen im Füllvolumen, dem Masse- druck am Umschalt- punkt sowie maximalem Massedruck auf Grund der Umschaltcharakteristik. Die ent- stehenden Prozessschwankungen werden durch die adaptive Bestimmung des Umschaltkriteriums kompensiert.

Entsprechend der notwendigen Eingriffsstärke mit der die prozessadaptive Schnecken- vorschubgeschwindigkeit erhöht wird, spielt das Regelungsverhalten in der Übergangsphase am Umschalt- punkt auch eine Rolle bei der Definition der Druckspitzen. Die Druckspitzen sind dabei im Vergleich zwischen der Einspritz- bewegung und dem Umschaltverhalten mit hohen Geschwindigkeiten und dem Umschaltverhalten bei geringer Schnecken- vorschubgeschwindigkeit verstärkt zu erwarten. Dies kann im betrachteten Bereich allerdings vernachlässigt werden.

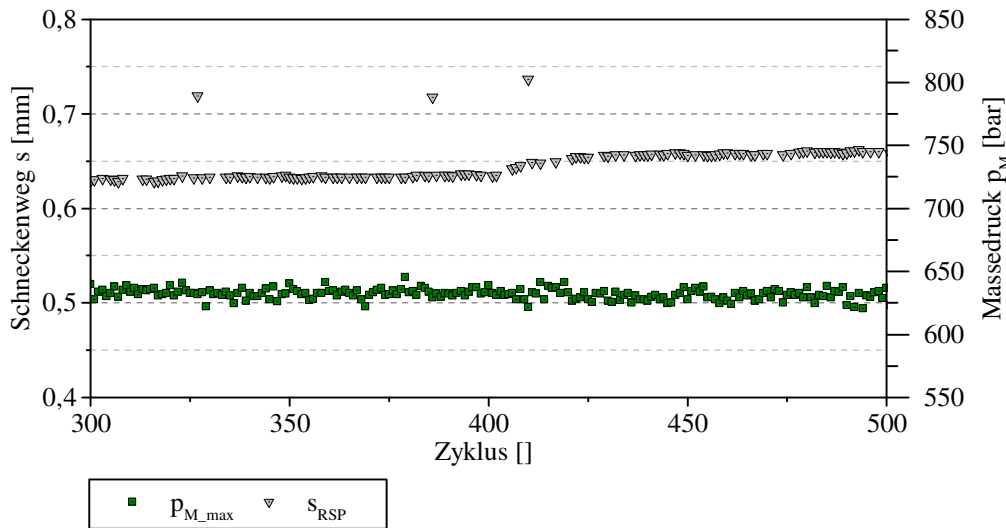


Abbildung 6-24 Darstellung des Schneckenwegs bis zum Erreichen der Druckgrenze und des maximalen Massedrucks bei Wechsel der Materialkonditionierung zur Darstellung des RSP-Schließverhaltens sowie des adaptiven Umschaltkriteriums

Unterschiede im Füllvolumen am Umschalt- punkt würden in deutlich unterschiedlichen maximalen Massedrü- cken beim Übergang zwischen Einspritz- und Nachdruckphase resultieren. Entsprechend der detektierten Un- terschiede im Schneckenweg und darüber verdrängtem Füllvolumen wird der Umschalt- punkt adaptiv an die Prozessbedingungen angepasst. Somit wird ein konstantes Füllvolumen sichergestellt und ein gleichmäßiger Übergang zur Nachdruckphase mit Bezug den zu aus dem Verhalten der anlageninternen Regelung resultie- renden Druckspitzen erzielt. Bei aktivierter Prozessregelung und einem adaptiven weggeregelten Umschalt- kriterium werden die Druckpeaks im Übergang zum Nachdruck bei der Materialkompression in einem gerin- gen Toleranzbereich konstant gehalten.

### 6.4.3 Validierung der Nachdruckanpassung

Die adaptive modellgestützte Nachdruckhöhe dient in erster Linie der Sicherstellung eines konstanten Bauteilgewichtes und der Schwindungskompensation. Nach der dargestellten Modellbeschreibung wird die Nachdruckhöhe entsprechend der mittleren Schnecken- vorschubgeschwindigkeit angepasst. Wird die prozessadaptive Regelung der Nachdruckhöhe abgeschaltet, liegt der voreingestellte konstante Nachdruck von  $p_{ND} = 355\text{bar}$  an.

In Abbildung 6-25 ist der Verlauf der mittleren Schnecken- vorschubgeschwindigkeit und der entsprechend prozessadaptiven Nachdruckhöhe über der Versuchsreihe dargestellt. Dabei folgt die mittlere Schnecken- vorschubgeschwindigkeit den notwendigen Modifikationen in der Einspritzphase entsprechend der Materialvis- kosität und bedingt nach der vorgestellten Modellbildung die Adaption der Nachdruckhöhe. Unter Berück-



sichtigung der Viskositätsunterschiede wird der Nachdruck bei höherer Viskosität im Vergleich zum Referenzprozess erhöht, bei einer geringeren Viskosität wird der Nachdruck reduziert. Die Adaption erfolgt vollautomatisch durch die implementierte Regelung.

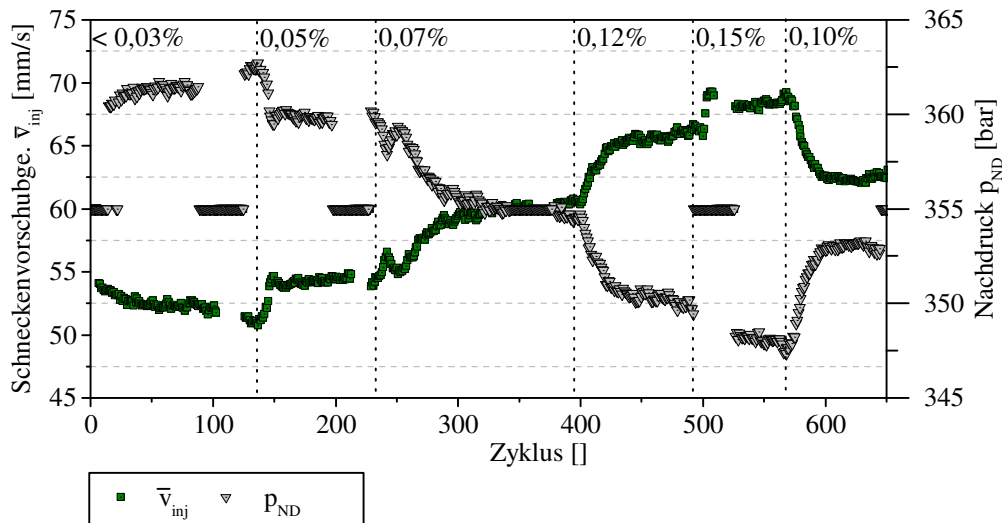


Abbildung 6-25 Verlauf der mittleren Schneckenverschubgeschwindigkeit und prozessadaptiven Nachdruckhöhe entsprechend der Variation der Materialeigenschaften

Für die Diskussion der Einflüsse der Prozessregelung auf das Bauteilgewicht wird der Wechsel der Materialkonditionierung von  $c_{H_2O} = 0,05\%$  bis  $c_{H_2O} = 0,10\%$  in Abbildung 6-26 dargestellt. Dabei zeigt der Bereich im Übergang von  $c_{H_2O} = 0,05\%$  bis einschließlich  $c_{H_2O} = 0,12\%$  mit einer guten Ausprägung der Phänomene auf Grund hoher Zykusanzahl, dass die Regelung auch bei diesen deutlichen Viskositätsunterschieden das Bauteilgewicht in einem engen Toleranzbereich konstant halten kann.

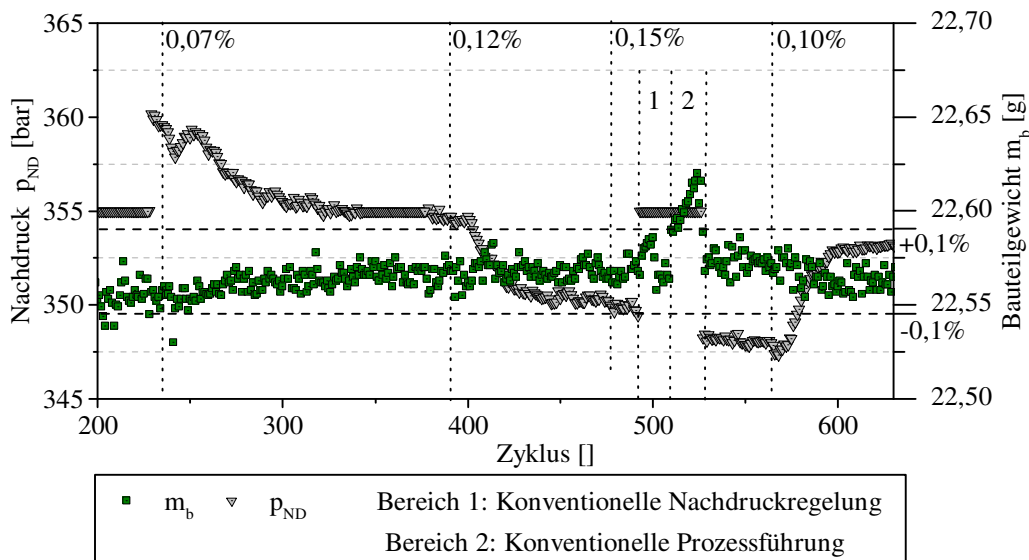


Abbildung 6-26 Verlauf des Bauteilgewichtes bei Materialkonditionierungswechseln unter Einfluss der Nachdruckhöhe

Insbesondere die markierten Bereiche 1 und 2 zeigen die Funktionalität der verschiedenen Phasen der Regelung. In Bereich 1 ist vorerst nur die adaptive Nachdruckregelung deaktiviert, ein konstanter Nachdruck von  $p_{ND} = 355\text{ bar}$  wird ohne Adaption reproduziert. In diesem Bereich ist ein Einfluss auf die Prozesskonstanz und das Bauteilgewicht erkennbar, die Regelung der Einspritzphase hat über die konstanten Bedingungen in Bezug auf Massetemperatur und Massedruck weiterhin einen positiven Einfluss auf das Qualitätskriterium

Bauteilgewicht. In Bereich 2 ist die Regelung vollständig deaktiviert und es wird mit konventioneller Prozessführung produziert. In diesem Bereich kann das Bauteilgewicht nicht in einem konstanten Bereich gehalten werden und die Prozessstabilität wird gefährdet.

Durch die Prozessregelung kann trotz Materialwechsel und veränderter Viskosität das Bauteilgewicht in einem Bereich von  $\pm 0,1\%$  um den Mittelwert der Referenzprozesseinstellungen konstant gehalten werden. Die Prozessregelung ist damit in der Lage, die Prozessschwankungen zu kompensieren und die Anforderungen an das Qualitätskriterium bei einer robusten Prozessführung zu erfüllen.

## 6.5 Diskussion der Ergebnisse und Grenzen des Regelungskonzeptes

Die umgesetzte Regelung erfüllt die Anforderungen an die Prozess- und Produktqualität. Durch die Implementierung von Prozesswissen über einen gelernten Referenzzyklus und der intelligenten Regelung resultierender Prozesskennzahlen kann mit einem direkten Bezug zu qualitätsrelevanten Parametern die Prozessführung verbessert werden. Dies wirkt sich durch die adaptive Regelung der Maschinenparameter entsprechend der Prozessbedingungen auf die Robustheit des Prozesses aus und erweitert das Toleranzfeld für die Verarbeitungsparameter des Werkstoffes. Die Umsetzung der Regelung innerhalb der Einspritzphase über einen PID-Regler lässt eine universelle Anwendung des Konzeptes ohne Modifikationen zu. Dabei ist allerdings das Druckübertragungsverhalten und dem entsprechend die Differenz zwischen dem Massedruck im Werkzeug, dem Massedruck im Schneckenvorräum sowie dem aus der Kraft am Schneckenchaft berechneten Massedruck zu berücksichtigen. Das notwendige Prozesswissen wird durch die Kalibrierung anhand des Referenzbetriebspunktes anforderungsspezifisch integriert, für den Regler ist kein weiteres Prozesswissen notwendig. Die noch auftretenden Variationen bei der Druckregelung und eingebrachten Antriebsenergie sind auf den für Produktionsverhältnisse sehr schnellen Wechsel in den Materialeigenschaften zurückzuführen. Durch einen erweiterten Übergangsbereich kann die Geschwindigkeitsanpassung und adaptive Vorsteuerung besser an die aktuellen Prozessbedingungen angepasst werden und die Konstanz weiter verbessert werden.

In Bezug auf den Restfeuchtegehalt des Materials sind allerdings weiterhin Grenzen gesetzt. Bei hohen Restfeuchteanteilen im Bereich der Sättigungsgrenze kann es bereits während der Plastifizierung zu einer Blasenbildung in der Schmelze kommen. Dies beeinflusst maßgeblich die Prozessstabilität und kann von der Regelung aktuell nicht kompensiert werden. Weitere Grenzen der Prozessregelung ergeben sich aus den Maschinenparametern. Zum einen ist die Adaption der Schneckenanschubgeschwindigkeit durch die maximale Antriebsleistung begrenzt. Hier wirkt sich die Korrelation zwischen einer Viskositätsreduzierung und hierüber einem resultierend niedrigeren Gegendruck bei der Werkzeugfüllung positiv auf die Kompensation durch eine erhöhte Schneckenanschubgeschwindigkeit und Antriebsleistung bei identischer Antriebsenergie in der Einspritzphase aus. Allerdings haben die Validierungsversuche gezeigt, dass bereits eine deutliche Erweiterung des Prozessfensters erzielt werden kann. Die Anforderungen an die Prozessqualität eines konstanten Massedruckprofils in der Einspritzphase sowie eines konstanten Massetemperaturprofils können innerhalb der dargestellten Variationsbandbreite der Viskosität erfüllt werden.

Bei der Betrachtung des adaptiven Umschaltpunktes sowie der Nachdruckregelung konnte die direkte positive Auswirkung auf das Qualitätskriterium des Bauteilgewichtes belegt werden. Abhängig von der Bauteilgeometrie ist hier die Kombination aus konstanten Bedingungen am Umschaltpunkt und der prozessadaptiven Nachdruckhöhe für ein konstantes Bauteilgewicht entscheidend. Die noch auftretenden Schwankungen innerhalb des Toleranzbandes können über eine detailliertere Parametrierung des Modellansatzes weiter verbessert werden. Allgemein ist allerdings der bereits abgedeckte Bereich von Viskositätsschwankungen, in denen die vorgestellte Prozessregelung die geforderten Qualitätskriterien in Bezug auf Prozess und Produkt erfüllt, für eine deutliche Erweiterung der Prozessfähigkeit ausreichend.

## 7 Prozess- und produktspezifische Qualitätsmerkmale

Neben den bereits dargestellten positiven Einflüssen der vorgestellten Prozessregelung sind noch weitere Kriterien in Betracht zu ziehen. Die dargestellte Konstanz im Massetemperaturprofil erhöht die Robustheit des Verarbeitungsprozesses insbesondere bei thermisch sensiblen Materialien, bei denen bereits leichte Temperaturunterschiede zu einer Materialschädigung oder Verfärbung führen können. Mit Bezug zur Morphologieausbildung ist insbesondere die Kombination aus der bereits angesprochenen Konstanz im Massetemperaturprofil mit den resultierenden geringen Differenzen im Massedruck bei der Füllung des Werkzeugs interessant. Die Ausbildung der Bauteilmorphologie erfolgt innerhalb der Füllphase maßgeblich bei dem Kontakt der Schmelzefront mit der temperierten Kavität innerhalb der Einspritzphase. Konstante Bedingungen in Bezug auf Druck und Temperatur begünstigen die gleichmäßige Morphologieausbildung trotz Variationen in der Materialviskosität.

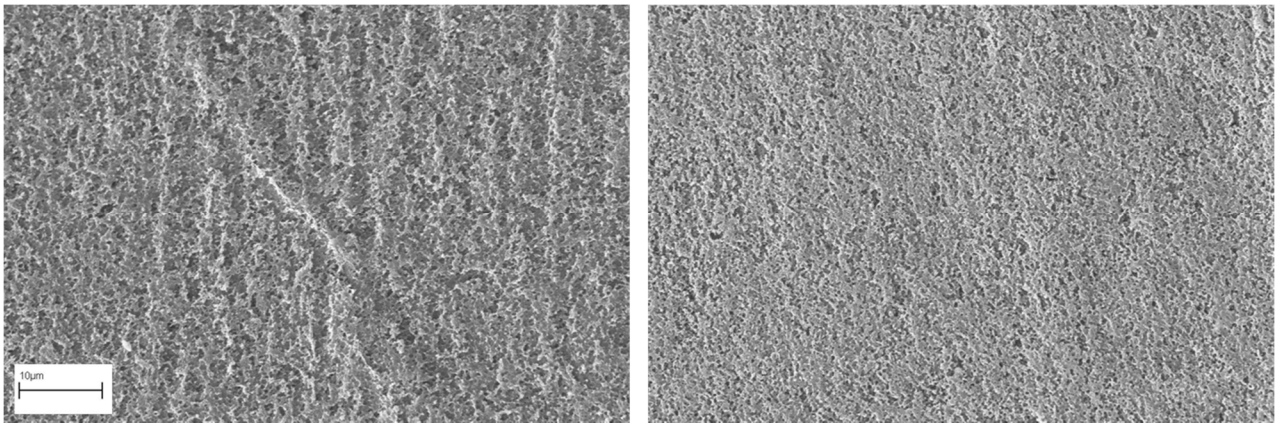


Abbildung 7-1 Vergleich der Bauteilmorphologie eines ABS-Bauteils mit unterschiedlichen Druck- und Geschwindigkeitsprofilen in der Einspritzphase

Ein Beispiel für Unterschiede in der Morphologieausbildung, bedingt durch Unterschiede im Druckprofil sowie der Schneckenanschubgeschwindigkeit in der Einspritzphase, sind in Abbildung 7-1 für eine ABS-Bauteiloberfläche dargestellt. Durch den an den Spritzgießprozess angeschlossenen Beizprozess werden die an der Oberfläche angelagerten Butadien-Anteile aus der Thermoplastmatrix gelöst und es entsteht die dargestellte aufgebrochene Oberflächenstruktur. Diese ist insbesondere für die Verankerung einer Metallschicht bei Galvanisierungsprozessen entscheidend. Durch Unterschiede in der Morphologie werden bei diesen hybriden Verarbeitungsprozessen die notwendigen Qualitätsanforderungen durch die vorgeschalteten Prozesse und Variationen bedingt. Für die hochkomplexe Verkettung ist ein besonderes Maß an Prozesskontrolle und adaptiver Prozessregelung erforderlich, um die Qualitätsanforderung in den Schnittstellen jedes Prozesses zu erfüllen. Variationen in den Materialeigenschaften und der Prozessführung führen zu Qualitätseinflüssen. Hier kann durch die Konstanz in den Prozessbedingungen bei der Ausbildung der Bauteilmorphologie ein Beitrag zur Verbesserung der Prozess- und Produktqualität geleistet werden.

Auf die Oberflächeneigenschaften und Qualität in Bezug auf Feuchtigkeitseinflüsse soll im Weiteren mit direktem Bezug zur der vorgestellten Prozessregelung eingegangen werden. Die Darstellung der Feuchtigkeitseinflüsse bei konventioneller Prozessführung wurde bereits in Kapitel 6.2.3 diskutiert. Abgeleitet aus den Fehlerbildern sind die Qualitätsanforderungen aus Sicht der Prozesskennzahlen durch die vorgestellte Prozessregelung erfüllt worden. Die Untersuchung des spezifischen Qualitätskriteriums einer unbeschädigten Hochglanzoberfläche muss direkt am Bauteil erfolgen und kann nur bedingt aus den Prozesskennzahlen abgeleitet werden.

## 7.1 Einfluss auf die Oberflächenqualität

Die Untersuchungen zum Einfluss der Restfeuchte auf die Prozesskennzahlen und die Bauteilqualität haben gezeigt, dass durch ausgasende sowie an der Kavität kondensierende Restfeuchte die Bauteiloberfläche beschädigt wird und Feuchtigkeitsschlieren entstehen. Der Prozess steht in direktem Zusammenhang zu der über die mit steigendem Restfeuchteanteil sinkenden Viskosität und dem darüber verringerten Druckniveau im Einspritzvorgang bei konventioneller Prozessführung. Eine Erhöhung der Einspritzgeschwindigkeit und hierüber Erhöhung des Massedruckes in der Einspritzphase zeigt, dass die Ausprägung der Defekte durch ausgasende Feuchtigkeit reduziert werden kann. Dies wird in Abbildung 7-2 an repräsentativen PA 6-Beispielbauteilen mit einer Restfeuchte von  $c_{H_2O} = 0,16\%$  und variierten Schneckenvorschubgeschwindigkeiten dargestellt.

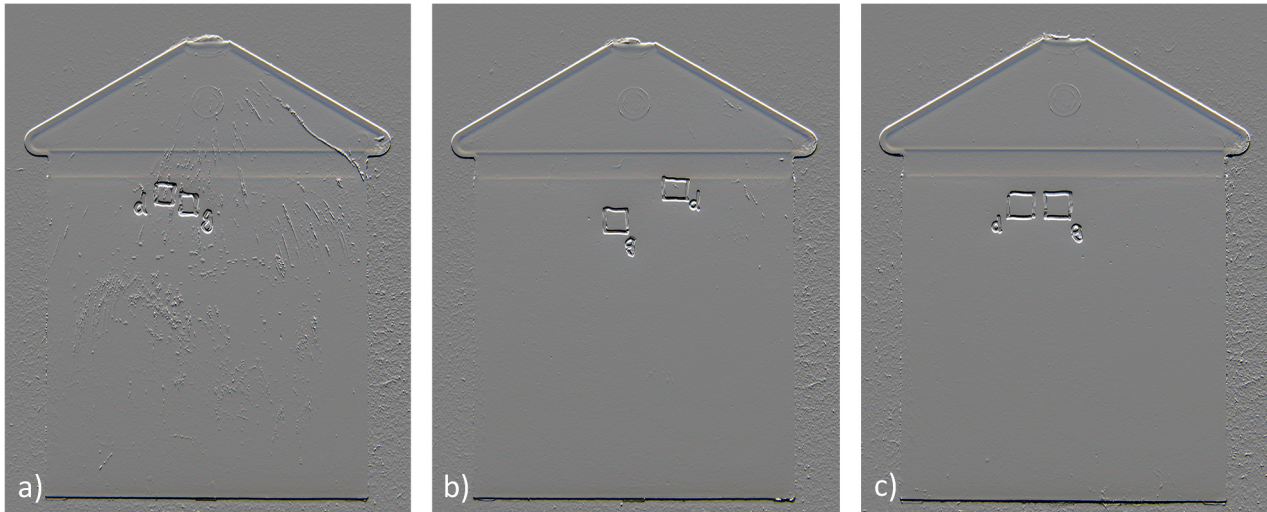


Abbildung 7-2 Einfluss ausgasender Restfeuchte auf die Bauteiloberfläche bei unterschiedlichen Massedrücken und Schneckenvorschubgeschwindigkeiten ( a) 60mm/s b) 70mm/s c) 90mm/s )

Während bei einer Schneckenvorschubgeschwindigkeit von  $v_{inj} = 60 \text{ mm/s}$  noch stark ausgeprägte Defekte mit einer hohen großflächigen Verteilung auf den Bauteilen aufgetreten sind, können diese durch eine Erhöhung der Schneckenvorschubgeschwindigkeit auf  $v_{inj} = 70 \text{ mm/s}$  bzw.  $v_{inj} = 90 \text{ mm/s}$  deutlich reduziert oder vermieden werden. Die dargestellten Aufnahmen der Bauteiloberfläche spiegeln bereits den signifikanten Einfluss der Störgröße sowie der Prozessparameter wieder. Auf Grund der nicht bei jedem Bauteil identisch ausgeprägten und lokal angeordneten Fehlerbilder ist die Bewertung der Oberfläche über den Gesamteindruck notwendig. Die Problematik, dass bei hochauflösenden Oberflächencharakterisierungen nur kleine Bereiche der Bauteile betrachtet werden können, wurde bereits in Kapitel 6.2.3 diskutiert. Da es bei den Defekten lediglich um eine direkte Unterscheidung zwischen einem sichtbaren Auftreten oder einer intakten Oberfläche geht, ist die subjektive Bewertung anhand der Aufnahmen ausreichend. Für Ansätze für eine objektive Bewertung der Oberflächenqualität mittels Kennzahlen soll unter anderem auf [Ba06, BF+14a, Gr14, GB+12] verwiesen werden.

Die Restfeuchteanteile im Material führen bei konventioneller Prozessführung zu einer Reduzierung des resultierenden Massedruckes während der Einspritzbewegung. Der reduzierte Massedruck ermöglicht ein Ausgasen der Feuchtigkeit bei hohen Massetemperaturen und beschädigt hierdurch, in Korrelation mit Kondensationseffekten an der Kavität, die Bauteiloberfläche. Eine Erhöhung der Schneckenvorschubgeschwindigkeit führt wiederum zu einem erhöhten Massedruck und verhindert darüber das Ausgasen der im Material gebundenen Feuchtigkeit. Die Oberfläche des Bauteils wird nicht beschädigt. Im direkten Vergleich mit der Prozessregelung, liegen die notwendigen Geschwindigkeitsanpassungen zur Verbesserung der Bauteiloberfläche im Bereich der durch die Regelung adaptiv vorgenommenen Modifikation der Schneckenvorschubgeschwindigkeit. Hierbei wird das referenzierte Massedruckprofil reproduziert und im Vergleich zur konventionellen Prozessführung bei steigendem Restfeuchteanteil der resultierende Massedruck durch die Prozessregelung angehoben.



Im Vergleich zu dem referenzierten Betriebspunkt bei einem Restfeuchteanteil von  $c_{H_2O} = 0,07\%$  ergibt sich bei einem Restfeuchtegehalt von  $c_{H_2O} = 0,15\%$  eine Adaption der mittleren Schneckenvorschubgeschwindigkeit von  $\bar{v}_{inj} = 60 \text{ mm/s}$  auf ca.  $\bar{v}_{inj} = 70 \text{ mm/s}$ . Dies entspricht der notwendigen Geschwindigkeitsanpassung, um die Massedruckverhältnisse beim Füllen der Kavität in einem engen Toleranzband konstant zu halten. Entsprechend der vorgestellten Untersuchungen zur Beschädigung der Bauteiloberfläche durch ausgasende Restfeuchteanteile, wird dieser Einfluss durch die Massedruckkonstanz reduziert. Im direkten Vergleich, dargestellt in Abbildung 7-3, zeigt sich der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Oberfläche bei konventioneller Prozessführung und der Kompensation durch Aktivierung der neuartigen Prozessregelung bei identischer Materialkonditionierung. Durch die vorgestellte Prozessregelung und druckgeregelte Prozessführung im Einspritzvorgang können Defekte durch ausgasende Feuchtigkeit in einem erweiterten Verarbeitungsfenster vermieden werden.

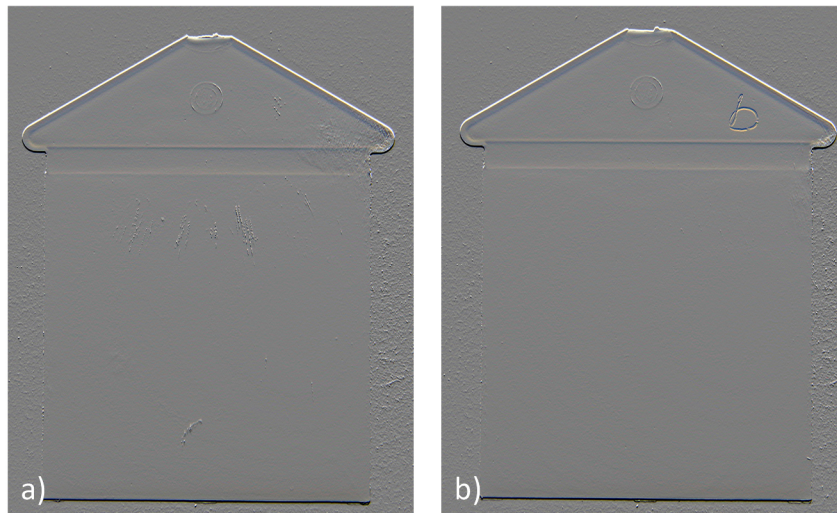


Abbildung 7-3 Vergleich der Einflüsse durch a) konventionelle Prozessführung und b) druckgeregelte Prozessführung auf die Oberflächenqualität bei hohen Restfeuchteanteilen

## 7.2 Potentiale durch ein erweitertes Verarbeitungsfenster

Die vorgestellte Prozessregelung ermöglicht die Verarbeitung von technischen Kunststoffen in einem erweiterten Toleranzbereich in Bezug auf die Kompensation von Viskositätsschwankungen. Diese sind beispielsweise bedingt durch variierende Restfeuchteanteile und durch Chargen- oder zeit- und temperaturbedingte Alterungseinflüsse. Unter Berücksichtigung der Qualitätskriterien kann eine Optimierung des Prozesses in Bereichen stattfinden, die vorher zu Qualitätsdefekten, wie den vorgestellten Feuchtigkeitsschlieren, geführt hat. Bei Materialien, wie dem analysierten PA 6 oder PBT, können durch eine Reduzierung der Viskosität über eine gezielte Konditionierung optimierte Prozessbedingungen und Bauteileigenschaften auf Grund der besseren Fließeigenschaften erzielt werden. Mit Bezug zu Oberflächeneigenschaften lassen sich insbesondere Mikrostrukturen besser bei einer geringen Viskosität abbilden [BF+14a, PB+13]. Die optimierten Fließeigenschaften wirken sich nicht nur positiv auf Mikrostrukturen, sondern auch auf komplexe Werkzeuggeometrien und Fließwege aus. Durch die vorgestellte Prozessregelung sind eine Konditionierung und Verarbeitung der Materialien in einem erweiterten Konditionierungsfenster und die Nutzung dieses Potentials möglich.

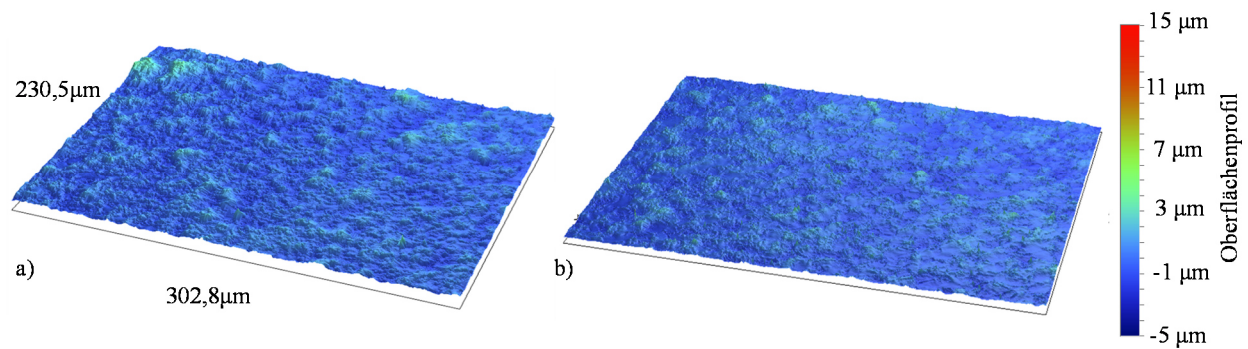


Abbildung 7-4 Einfluss erhöhter Restfeuchteanteile auf die Bauteiloberfläche am Beispiel von PBT

( a )  $c_{H_2O} < 0,01\%$  b )  $c_{H_2O} = 0,03\%$  )

Wird beispielsweise die in Abbildung 7-4 dargestellte defektfreie Oberfläche von zwei PBT-Probekörper mit unterschiedlicher Restfeuchtigkeit und Viskosität in einer Detailansicht betrachtet, so ist die deutlich glattere Abformung der Werkzeugoberfläche bei dem niedrigviskoserem Material zu erkennen. Die Überschreitung der Restfeuchtigkeitsgrenze führt ohne Prozessregelung zu Defekten, wie in Kapitel 6.2.3 auch für PBT dargestellt. Durch die Anwendung der Prozessregelung sind diese Effekte nutzbar, ohne andere Qualitätskriterien negativ zu beeinflussen.

Die dargestellten Anforderungen an die Oberfläche und Bauteilmorphologie sind lediglich Beispiele für Anwendungen bei denen die Prozessqualität und Konstanz der Qualitätskriterien der Bauteile durch die vorgestellte Prozessregelung gesteigert werden kann. Die jeweiligen Anforderungen und detaillierten Qualitätskriterien sind anwendungsspezifisch zu definieren. Die allgemeinen Anforderungen für eine Steigerung der Konstanz innerhalb der Prozessbedingungen konnten bereits nachgewiesen werden. Die dargestellte Steigerung der Prozessqualität in Hinblick auf die Massetemperatur sowie das Massedruckprofil unterstützt die Ausprägung der Qualitätskriterien unter konstanten Prozessbedingungen.

## 8 Fazit und Ausblick

Die steigenden Anforderungen an die Qualität der Produkte und deren funktionelle Eigenschaften bedingen die zunehmende Komplexität von Fertigungsprozessen. Vielfach sind Bauteile, insbesondere in der Kunststoffverarbeitung, ein hybrider Verbund von Werkstoffsystemen. Die Entwicklungen im Bereich der Anlagentechnik sichern heutzutage höchste Anforderungen an die Maschinenfähigkeit, Prozesssicherheit sowie Variationsmöglichkeiten im Aufbau der Fertigungsprozesse. Die zunehmende Individualisierung der Fertigungsstraßen geht dabei mit den spezifischen Anforderungen der Produkte, aber auch zunehmend kleineren Produktionschargen einher. Die komplexen Anforderungen der Produktqualität mit flexiblen Produktionsanlagen individuell sicher zu stellen, ist eine Herausforderung aktueller Produktionstechnologie.

Das Spritzgießverfahren bietet eine große Bandbreite an Variationen im Aufbau des Produktionsprozesses, um Werkstoffsysteme inline zu kombinieren, komplexe Geometrien zu formen und direkt funktionelle Eigenschaften durch den Fertigungsprozess zu integrieren. Allerdings sind die spezifischen Anforderungen jedes Prozessschrittes sowie die jeweiligen Störgrößen zu beachten. Dies bedingt, dass trotz eines hohen Standards in der Prozessfähigkeit und Maschinenfähigkeit durch die Reproduzierung eingestellter Maschinenparameter die Qualitätsanforderungen nicht sichergestellt werden können. Bei den gestellten Anforderungen an Werkstoffe und Anlagentechnik bedingen bereits geringe Schwankungen der Eingangsgrößen eine Störung der Qualitätskriterien.

Welche Auswirkungen bereits geringe Schwankungen der Materialeigenschaften, die Materialkonditionierung sowie zeit- und temperaturabhängige Einflüsse auf die Qualitätskriterien haben können, konnte sowohl in der Prozesssimulation als auch im realen Spritzgießprozess dargestellt werden. Dabei ist das Verständnis des Materialverhaltens sowie der möglichen Einflüsse entscheidend, um bestehende Prozesse optimieren und weiterentwickeln zu können. Der vorgestellte Ansatz zur Beschreibung der Einflüsse aus zeit-, temperatur- und restfeuchtebedingten Alterungsprozessen auf die Materialeigenschaften unterstützt das Verständnis von Prozessschwankungen sowie deren Ursache. Eine detaillierte Beschreibung des Materialverhaltens ist mit der vorgestellten Materialcharakterisierung sowie dem entwickelten Modellansatz möglich. Insbesondere bei der Verarbeitung technischer Kunststoffe mit hydrophilen Eigenschaften ist bei der Verkettung von Trocknungsprozess, Spritzgießprozess und möglichen Veredelungsprozessen eine detaillierte Kenntnis der Materialeigenschaften, Schnittstellenanforderungen der Prozesse und entsprechende Prozesskontrolle notwendig. Hinzu kommen die Variationen durch die Maschinenfähigkeit, die aktuell hauptsächlich auf das Schließverhalten der Rückströmsperre zurückzuführen sind.

Die vorgestellte Prozesscharakterisierung zeigt, dass mit aktueller Messtechnik an Spritzgießanlagen eine hochauflösende Beschreibung der aktuellen Prozessbedingungen sowie Änderungen möglich ist. Hier zeigt sich ein Vorteil bei elektrisch angetriebenen Anlagen durch die Verfügbarkeit von Messdaten aus den Antrieben. Daneben bieten auch hydraulische Antriebskonzepte aktuell sehr gute Möglichkeiten der Prozesscharakterisierung durch integrierte Sensorik bei Hydraulikdrücken, Zylinderhüben sowie Volumenströmen und Pumpenleistung. Um die Robustheit des Spritzgießprozesses zu steigern, ist eine adaptive Prozessregelung notwendig. Die vorgestellte Prozessregelung umfasst dabei die Phasen des Einspritzens sowie des Nachdruckes und kompensiert Einflüsse durch Variationen in der Materialviskosität sowie dem Schließverhalten der RSP. In sehr guter Korrelation zu der Materialcharakterisierung, Modellbildung und Simulation steigert die adaptive Regelung die Prozess- und Produktqualität. In Bezug auf die Konstanz des Masstemperaturprofils, des Masseedruckprofils sowie der über das Bauteilgewicht definierten Qualitätskriterien konnten die positiven Einflüsse des Regelkonzeptes dargestellt werden. Hinzu kommen die Kompensation restfeuchtebedingter Oberflächendefekte sowie Potentiale in der Ausbildung der Bauteilmorphologie. Das Regelkonzept kann dabei unabhängig vom jeweiligen Antriebskonzept der Spritzgießmaschine sowohl bei elektrisch als auch hydraulisch angetriebenen Anlagen integriert werden.

Vor dem Hintergrund hybrider Fertigungsprozesse und komplexer Anforderungen an Schnittstellen und Qualitätskriterien ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale durch die vorgestellte Mate-

rialcharakterisierung, Modellbildung und Prozessregelung. Die hohe Temperaturkonstanz unterstützt die Verarbeitung thermisch sensibler Materialien, während gleichzeitig bei störanfälligen Verarbeitungsprozessen Einflüsse durch Variationen der Materialeigenschaften kompensiert werden. Die Funktionalität der Regelung wurde für Beispielkriterien dargestellt. Im Weiteren gilt es dies auf spezifische Anforderungen, komplexe Werkzeuggeometrien und Materialkombinationen zu übertragen. Dabei spielt zum einen die Oberfläche der Bauteile, zum anderen der morphologische Schichtaufbau und die mechanischen Anforderungen eine wichtige Rolle.



## 9 Literaturverzeichnis

- [AB02] Albertson, A. S.; Brendel, M. V., *Investigation of Injection Molding Process Robustness for Various Molding Strat.* SPE Annual Technical Conference (ANTEC), USA, (2002).
- [ABB98] Alewelt, W.; Becker, G. W.; Bottenbruch, L., *Polyamide*. Carl Hanser Verlag, München [u.a.], (1998).
- [ABW92] Al-Hadithi, T. S. R.; Barnes, H. A.; Walters, K., *The relationship between the linear (oscillatory) and nonlinear (steady-state) flow properties of a series of polymer and colloidal systems.* In *Colloid & Polymer Science*, 270. 1, (1992); S. 40–46.
- [AD07] Abu-Ayyad, M.; Dubay, R., *Development of an extended predictive controller for injection speed.* SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Cincinnati, Ohio (USA), (2007).
- [Ba06] Bauer, N., *Leitfaden zur Inspektion von Oberflächen mit Bildverarbeitung*. Fraunhofer-Allianz Vision, Erlangen, (2006).
- [Ba08] Bader, C., *Und sie bewegt sich doch.* In *Kunststoffe*. 06, (2008); S. 60–65.
- [Ba13] Bauer, R., *Expertensystem für funktionelle Oberflächen.* In *Kunststoffe*. 06, (2013); S. 44–45.
- [Ba85] Batzer, H., *Polymere Werkstoffe*. Thieme, Stuttgart [u.a.], (1985).
- [BBC90] Becker, G. W.; Braun, D.; Carlowitz, B., *Kunststoff Handbuch*. Hanser, München, (1990).
- [BC+13] Braun, D.; Cherdron, H.; Rehahn, M.; Ritter, H.; Voit, B., *Polymer Synthesis: Theory and Practice*. Springer, Berlin, Heidelberg, (2013).
- [Be93] Beiermeier, B., *In-Line Rheometrie beim Spritzgießen: Ein Beitrag zur kontinuierlichen Qualitätserfassung*. 13. Stuttgarter Kunststoffkolloquium, Heidelberg, (1993).
- [BF+14a] Berger, G.; Friesenbichler, W.; Pacher, G.; Gruber, D. P., *Hochqualitative Bauteiloberflächen im Spritzguss - Möglichkeiten und Grenzen der Prozessführung*. Spritzgießen und Veredeln, Duisburg, (2014a).
- [BF+14b] Berger, G.; Friesenbichler, W.; Gruber, D. P.; Pacher, G.; Macher, J., *Rapid Heat Cycle Molding, Surface Topography and Visual Appearance of Injection Molded Parts. Research Work in Leoben in the Last 10 Years.* SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers (SPE), Las Vegas (Nevada), USA, (2014b).
- [BF+14c] Berger, G.; Friesenbichler, W.; Pacher, G.; Rescher, M., *Sink Mark Shape Depending on Holding Pressure and Rapid Heat Cycle Molding – Mathematical Approximation and Key Parameters.* SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Las Vegas (Nevada), USA, (2014c).
- [BG+13] Berger, G.; Gruber, D. P.; Pacher, G.; Friesenbichler, W., *An overview on research work in leoben in the fields of rapid heat cycle molding, surface topography and visual appearance on injection molded parts.* Advances in Plastics Technology (APT), Sosnowiec, Poland, (2013).
- [BHB92] Birley, A. W.; Haworth, B.; Batchelor, J., *Physics of plastics*. Processing, properties, and materials engineering. Hanser, Munich [etc.], (op. 1992).
- [Bi08] Bichler, M., *Qualitätssicherung beim Spritzgießen*. Werkzeuge abmustern - Werkzeuginnen-druck nutzen - Formteilqualität sichern. Hüthig Verlag, Heidelberg, Neckar, (2008).
- [Bi12] Bichler, M., *Prozessgrößen beim Spritzgießen*. Analyse und Optimierung. Beuth, Berlin, Wien, Zürich, (2012).
- [BK12] Bader, C.; König, E., *Wir regeln das schon.* In *Kunststoffe*. 06, (2012); S. 62–67.

- [BKS13] Bader, C.; König, E.; Schmidt, C., *Qualität aus der Tiefe des Werkzeugs*. In *Kunststoffe*. 06, (2013); S. 46–51.
- [BL+83] Booij, H. C.; Leblans, P.; Palmen, J.; Tiemersma-Thoone, G., *Nonlinear viscoelasticity and the Cox–Merz relations for polymeric fluids*. In *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 21. 9, (1983); S. 1703–1711.
- [Bl96] Bluhm, R., *Verbesserte Temperaturkontrolle beim Kunststoffspritzgießen*. Verl. der Augustinus-Buchh., Aachen, (1996).
- [Bo11] Bozzelli, J., *Injection Molding: You Must Dry Hygroscopic Resins*. In *Plastics Technology*. 57, (2011); S. 27.
- [Bo94] Bourdon, R., *Zur Optimierung der Prozeßrobustheit beim Spritzgießen*. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, (1994).
- [Br06] Brunotte, R., *Die thermodynamischen und verfahrenstechnischen Abläufe der in-situ-Oberflächenmodifizierung beim Spritzgießen*. FKTU, Chemnitz, (2006).
- [Br08] Brunner, F. J., *Taschenbuch Qualitätsmanagement*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, (2008).
- [Br10] Broy, M., *Cyber-Physical Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, (2010).
- [Br11] Brecher, C., *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, (2011).
- [Br14] Brettnich, T., *Funktionale Oberflächen durch In-Mould-Verfahren im Spritzgießen*. Spritzgießen und Veredeln, Duisburg, (2014).
- [BZ10] Bader, C.; Zeller, S. C., *Die Entdeckung der Schmelzefront*. In *Kunststoffe*. 06, (2010); S. 46–50.
- [Ca05] Cavic, M., *Kontinuierliche Prozessüberwachung beim Spritzgießen unter Einbeziehung von Konzepten zur Verbesserung der Schmelzequalität*. Shaker, Aachen, (2005).
- [Ca68] Carreau, P. J., *Rheological Equations from Molecular Network Theories*. Dissertation, University of Wisconsin, Wisconsin (USA), (1968).
- [Ca72] Carreau, P. J., *Rheological Equations from Molecular Network Theories*. In *Journal of Rheology*, 16. 1, (1972); S. 99.
- [CC06] Celina, M.; Clough, R., *Remote inhibition of polymer degradation*. In *Polymer*, 47. 1, (2006); S. 289–292.
- [CCD97] Carreau, P. J.; Chhabra, R. P.; DeKee, Daniel C. R, *Rheology of polymeric systems*. Carl Hanser Publishers, Munich [u.a.], (1997).
- [CCJ06] Celina, M.; Clough, R.; Jones, G., *Initiation of polymer degradation via transfer of infectious species*. In *Polymer Degradation and Stability*, 91. 5, (2006); S. 1036–1044.
- [CCS96] Chang, R. Y.; Chen, C. H.; Su, K. S., *Modifying the tait equation with cooling-rate effects to predict the pressure-volume-temperature behaviors of amorphous polymers: Modeling and experiments*. In *Polymer Engineering and Science*, 36. 13, (1996); S. 1789–1795.
- [Ce13] Celina, M. C., *A Review of Polymer Oxidation and its Relationship with Materials Performance and Lifetime Prediction*. In *Polymer Degradation and Stability*, (2013).
- [CHD11] Charest Finn, M. A.; Hernández, J. M.; Dubay, R., *Cavity Peak Pressure Control During Packing Using Model Predictive Control Theory*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Boston, Massachusetts (USA), (2011).

- [CM58] Cox, W. P.; Merz, E. H., *Correlation of dynamic and steady flow viscosities*. In *Journal of Polymer Science*, 28. 118, (1958); S. 619–622.
- [CM96] Chen, Y. T.; Macosko, C. W., *Kinetics and rheology characterization during curing of dicyanates*. In *Journal of Applied Polymer Science*, 62, (1996); S. 567–576.
- [CR08] Chhabra, R. P.; Richardson, J. F., *Non-Newtonian flow and applied rheology*. Engineering applications. Butterworth-Heinemann/Elsevier, Amsterdam, Boston, (2008).
- [CV06] Colin, X.; Verdu, J., *Polymer degradation during processing*. In *Comptes Rendus Chimie*, 9. 11-12, (2006); S. 1380–1395.
- [CW09] Class, H.; Wippenbeck, P., *Ein faszinierender Streifzug*. In *Kunststoffe*. 10, (2009); S. 108–115.
- [DE86] Doi, M.; Edwards, S. F., *The theory of polymer dynamics*. Clarendon Press, Oxford, (1986).
- [DET03] Diao, L.; Edwards, R.; Thomas, C., *A Comparison of Position, Cavity Pressure, and Ultrasound Sensors for Switch/Ov*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Nashville, Tennessee, USA, (2003).
- [DI05] Norm DIN EN ISO 9000: 2005, *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005)*.
- [DI12a] Norm DIN 50035:2012-09: 2012a, *Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien – Polymere Werkstoffe*.
- [DI12b] Norm DIN EN ISO 1133: 2012b, *Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten*.
- [DI13] Norm DIN EN ISO 11357-3:2013: 2013, *Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 3: Determination of temperature and enthalpy of melting and crystallization (ISO 11357-3:2011); German version EN ISO 11357-3:2013*.
- [DI87] Norm DIN 24450: 1987, *Maschinen zum Verarbeiten von Kunststoffen und Kautschuk; Begriffe*.
- [DKM12] Dehouche, N.; Kaci, M.; Mokhtar, K. A., *Influence of thermo-oxidative aging on chemical composition and physical properties of polymer modified bitumens*. In *Construction and Building Materials*, 26. 1, (2012); S. 350–356.
- [DM88] Dymond, J. H.; Malhotra, R., *The Tait equation: 100 years on*. In *International Journal of Thermophysics*, 9. 6, (1988); S. 941–951.
- [Dö12] Dörner, J., *Spritzgießen elektrisch leitfähiger Thermoplaste Prozesstechnik und Modellbildung*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2012).
- [Do78] Doležěl, B., *Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi*. Carl Hanser Verlag, München, (1978).
- [DPE99] Duriau-Montagne, F.; Pongratz, S.; Ehrenstein, G. W., *Studies of the thermal and thermooxidative degradation of polypropylene during processing and usage*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), New York, USA, (1999).
- [DS+08] Drummer, D.; Schmidt, A.; Seefried, A.; Ehrenstein, G. W.; Kühnert, I., *Einfluss der Prozessführung auf die Bauteileigenschaften bei der Druckverfestigung amorpher Thermoplaste*. In *Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology*. 8 (2012) 2, (2008); S. 139–179.
- [DW99] Dealy, J. M.; Wissbrun, K. F., *Melt rheology and its role in plastics processing*. Theory and applications. Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass, London, (1999).
- [EGW04] Endert, S.; Gaitzsch, E.; Wendisch, P., *Simulation mit varierten Stoffdaten*. In *Kunststoffe*, 92. 04, (2004); S. 66–69.
- [Eh11] Ehrenstein, G. W., *Polymer-Werkstoffe*. Hanser Verlag, München, (2011).

- [Eh92] Ehrenstein, G. W., *Kunststoff-Schadensanalyse*. Carl Hanser Verlag, München [u.a.], (1992).
- [Em85] Emanuel, N., *Thermo-oxidative ageing of polymers*. In *Polymer Science U.S.S.R.*, 27. 7, (1985); S. 1505–1525.
- [EP07] Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S., *Beständigkeit von Kunststoffen*. Carl Hanser Verlag, München, (2007).
- [ERT03] Ehrenstein, G. W.; Riedel, G.; Trawiel, P., *Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen*. Hanser, München, (2003).
- [Eu14] Eulenstein, T., *Heimische Ressourcen gezielt nutzen*. In *Kunststoffe*. 01, (2014); S. 15.
- [EZ+11] El Otmani, R.; Zinet, M.; Boutaous, M.; Benhadid, H., *Numerical simulation and thermal analysis of the filling stage in the injection molding process: Role of the mold-polymer interface*. In *Journal of Applied Polymer Science*, 121. 3, (2011); S. 1579–1592.
- [FH+08] Fu, Y.-J.; Hsiao, S.-W.; Hu, C.-C.; Lee, K.-R.; Lai, J.-Y., *Prediction of long-term physical ageing of poly(methyl methacrylate) membranes for gas separation*. In *Desalination*, 234. 1-3, (2008); S. 51–57.
- [FHS07] Frick, A.; Harsch, G.; Stern, C., *Industrielle Kunststoffprüfung*. Carl Hanser Verlag, München, (2007).
- [FRS04] Frick, A.; Rochman, A.; Stern, C., *Werkstoffbasierte Prozesskontrolle empfohlen; Einfluss der Prozessbedingungen auf die Eigenschaften von Spritzgussteilen*. In *Kunststoffe*. 08, (2004); S. 132–135.
- [FSS11] Fleischmann, A.; Stary, C.; Schmidt, W., *Subjektorientiertes Prozessmanagement*. Carl Hanser Verlag, München, (2011).
- [GA05] Grellmann, W.; Altstadt, V., *Kunststoffprüfung*. Carl Hanser Verlag, München [u.a.], (2005).
- [GB+02] Grillet, A. M.; Bogaerds, A. C. B.; Peters, G. W. M.; Baaijens, F. P. T.; Bulters, M., *Numerical analysis of flow mark surface defects in injection molding flow*. In *Journal of Rheology*, 46. 3, (2002); S. 651.
- [GB+08] Gruber, D. P.; Buder-Stroisnigg, M.; Wallner, G.; Strauß, B.; Jandel, L.; Lang, R. W., *A novel methodology for the evaluation of distinctness of image of glossy surfaces*. In *Progress in Organic Coatings*, 63. 4, (2008); S. 377–381.
- [GB+11] Gruber, D. P.; Berger, G.; Pacher, G.; Friesenbichler, W., *Novel approach to the measurement of the visual perceptibility of sink marks on injection molding parts*. In *Polymer Testing*, 30. 6, (2011); S. 651–656.
- [GB+12] Gruber, D. P.; Buder-Stroisnigg, M.; Wallner, G.; Strauß, B.; Jandel, L.; Lang, R. W., *Characterization of gloss properties of differently treated polymer coating surfaces by surface clarity measurement methodology*. In *Applied Optics*. Vol. 51, No. 20, (2012); S. 4833–4840.
- [GD14] Gutgar, U.; Dahlhaus, M., *Designmöglichkeiten durch galvanische Beschichtung von ABS und Mehr-K-Bauteile*. Spritzgießen und Veredeln, Duisburg, (2014).
- [GK08] Geiger, W.; Kotte, W., *Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven*. Vieweg, Wiesbaden, (2008).
- [Go05] Gornik, C., *Rheologische Messungen an der Spritzgießmaschine*. In *Kunststoffe*. 04, (2005); S. 88–92.
- [Go09] Gornik, C., *Abgeleitete Kenngrößen zur Optimierung nutzen*. In *Kunststoffe*. 09, (2009); S. 30–34.
- [Go13] Gogoll, V., *Auf den Punkt temperiert*. In *FORM+Werkzeug*, 05/2013. 5, (2013); S. 26–27.

- [Gr05] Gruber, J.-M., *Prozessführung beim Thermoplastspritziessen auf Basis des Werkzeuginnen-drucks*. Mainz, Aachen, (2005).
- [Gr13] Gründel, F., *Simulieren statt probieren*. In *Kunststoffe*. 06, (2013); S. 64–66.
- [Gr14] Gruber, D. P., *Measuring the Visible - Charakterisierung und Optimierung der Optik von Spritzgussteilen und Beschichtungen*. Spritzgießen und Veredeln, Duisburg, (2014).
- [Gu04] Gundlach, C., *Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung*. Kassel Univ. Press, Kassel, (2004).
- [Ha04] Haman, S., *Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Spritzgießen*. Dissertation, TU Chemnitz, Chemnitz, (2004).
- [Ha12] Hans-Jürgen Popp, Thorsten Köhler, *Turbo für Einspritzen und Auswerfen*. In *Kunststoffe*. 09, (2012); S. 36–40.
- [Hä95] Häussler, J., *Eine Qualitätssicherungsstrategie für die Kunststoffverarbeitung auf der Basis künstlicher neuronaler Netzwerke*. VDI-Verlag, Düsseldorf, (1995).
- [HAB11] Hopmann, C.; Arping, T.; Baranowski, T., *Bauteileigenschaften präzise vorhersagen*. In *Kunststoffe*. 07, (2011); S. 44–49.
- [HAM92] Hamid, S. H.; Amin, M. B.; Maadhah, A. G., *Handbook of polymer degradation*. M. Dekker, New York, (1992).
- [HBK11] Hochrein, T.; Botos, J.; Kugler, C., *Prozessnahe Qualitätssicherung; Trends und neue Entwicklungen in der Prozessmesstechnik für die Kunststoffverarbeitung*. In *Ingenieurspiegel*, 03/2011. 03, (2011); S. 22–24.
- [He76] Hengesbach, J. A., *Verbesserung der Prozeßführung beim Spritzgießen durch Prozeßüberwachung*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, (1976).
- [He77] Hellmeyer, H. O., *Ein Beitrag zur Automatisierung des Spritzgießprozesses*, RWTH Aachen, Aachen, (1977).
- [HIL10] Hamada, H.; Iwami, H.; Leong, Y. W., *On the Improvement of Surface Quality in Injection Molded Articles by Wet Regulated Insulation Molding*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Orlando, Florida, USA, (2010).
- [HJ+08] Ho-Hsiang, W.; Jeng-Shen, H.; Jui-Pin, Y.; Ping-Shun, H.; Shia-Chung, C., *Variable Mold Temperature for Improving Surface Quality of Microcellular Injection Molded Parts Using Induction Heating Technology*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Milwaukee, Wisconsin (USA), (2008).
- [Ho11] Hofmann, M., *Entwicklung und Validierung eines Bewertungsmodells für Projekte der statistischen Versuchsplanung*. Dissertation, Technischen Universität Berlin, Berlin, (2011).
- [Ho12] Hochrein, T., *Reale Aufgaben für virtuelle Sensoren*. In *Kunststoffe*. 02, (2012).
- [HP04] Huang, Y.; Paul, D., *Experimental methods for tracking physical aging of thin glassy polymer films by gas permeation*. In *Journal of Membrane Science*, 244. 1-2, (2004); S. 167–178.
- [HR14] Hopmann, C.; Reißmann, A., *Self-optimizing in Injection Molding and the Problem at Compensating Viscosity Fluctuations*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers (SPE), Las Vegas (Nevada), USA, (2014).
- [HS+14] Holzinger, G. P.; Schiffers, R.; Moser, S.; Kruppa, S., *An Adaptive Filling to Packing Switch-over Method for Injection Molding*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers (SPE), Las Vegas (Nevada), USA, (2014).

- [Hü85] Hüppe, R., *Sensoreinsatz zur direkten, kontinuierlichen Erfassung und Regelung von Produkteigenschaften beim Spritzgießen*. Polymertechnik/Kunststofftechnik, Berlin, (1985).
- [Hu95] Hutchinson, J. M., *Physical aging of polymers*. In Progress in Polymer Science, 20. 4, (1995); S. 703–760.
- [IBR09] Iannuzzi, G.; Boldizar, A.; Rigdahl, M., *Characterization of Flow-Induced Surface Defects in Injection Moulded Components – Case Studies*. In Annals transactions of the nordic rheology society. Vol. 17, (2009).
- [IH01] Ilinca, F.; Hétiu, J.-F., *Three-dimensional Filling and Post-filling Simulation of Polymer Injection Molding*. In International Polymer Processing The Journal of the Polymer Processing Society. XVI, (2001); S. 291–301.
- [IN08] Ito, M.; Nagai, K., *Degradation issues of polymer materials used in railway field*. In Polymer Degradation and Stability, 93. 10, (2008); S. 1723–1735.
- [In14] Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), *Integrative Kunststofftechnik 2014*. 27. Internationales Kolloquium Kunststofftechnik. Shaker, Herzogenrath, (2014).
- [JC+11] Jong, W.-R.; Chang, Y.-C.; Lin, C.-H.; Li, T.-C., *Study of the Taguchi Method on the Ejection Force of the Injection Molding Machine*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Boston, Massachusetts (USA), (2011).
- [JM04] Johannaber, F.; Michaeli, W., *Handbuch Spritzgießen*. Carl Hanser Verlag, München, (2004).
- [Jo04] Johannaber, F., *Kunststoff-Maschinenführer*. Carl Hanser Verlag, München, (2004).
- [Ke07] Kettler, E., *Rheologie komplexer Flüssigkeiten*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, (2007).
- [KH+13] Kruppa, S.; Hämmerl, S.; Schiffers, R.; Krampe, E.; Wintermantel, E., *Analysis of the filling cycle and automated determination of the change-over point with sensor systems on the machine and comparison with conventional switchover methods in injection molding*. Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting (PPS 29), Nuremberg, Germany, (2013).
- [KJ+10] Kahlen, S.; Jerabek, M.; Wallner, G.; Lang, R. W., *Characterization of physical and chemical aging of polymeric solar materials by mechanical testing*. In Polymer Testing, 29. 1, (2010); S. 72–81.
- [KI09] Kleppmann, W., *Taschenbuch Versuchsplanung*. Produkte und Prozesse optimieren. Carl Hanser Verlag, München [u.a.], (2009).
- [Kö14] König, E., *Innovative Möglichkeit zur Qualitätssteigerung von Spritzgussteilen auf Basis von Werkzeuginnendruck und Werkzeugwandtemperatur*. Spritzgießen und Veredeln, Duisburg, (2014).
- [Kö90] Kögler, M., *Qualitätsaussagen unmittelbar nach jedem Schuß*. In Plastverarbeiter, 41, (1990); S. 122–124.
- [KP80] Kulicke, W.-M.; Porter, R. S., *Relation between steady shear flow and dynamic rheology*. In Rheologica Acta, 19. 5, (1980); S. 601–605.
- [KS08] Knappe, S.; Sauseng, B., *DSC - mehr als Materialidentifikation*. In Kunststoffe. 10, (2008); S. 62–65.
- [Ku98] Kudlik, N., *Reproduzierbarkeit des Kunststoff-Spritzgießprozesses*. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag; Mainz, Aachen, (1998).

- [KV+10] Kazmer, D. O.; Velusamy, S.; Westerdale, S.; Johnston, S.; Gao, R. X., *A comparison of seven filling to packing switchover methods for injection molding*. In *Polymer Engineering & Science*, 50, 10, (2010); S. 2031–2043.
- [La96] Lampl, A., *Mischgütekennzahl für Spritzgießmaschinen*. In *Kunststoffe*, 86, (1996); S. 1256–1260.
- [LB+89] Patentschrift DE3927995 C2. (31.10.1989), Lauterbach, M.; Breuer, P.; Boukes, G.; Dahmen, J., *Method for controlling the phase of reproduction in injection molding of thermoplastic plastics*. Pr.: 01.03.1989.
- [LGP83] Lampl, A.; Gissing, K.; Painsith, H., *Kontrolle des Formfüllvorgangs beim Spritzgießen mit Hilfe der Einspritzarbeit*. In *Plastverarbeiter*, 10, (1983); S. 1105–1108.
- [Li11] Linß, G., *Qualitätsmanagement für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag, München, (2011).
- [LO+73] Lovett, A. J.; O'Donnell, W. G.; Sutton, G. J.; Tighe, B. J., *Poly  $\alpha$ -ester degradation studies. IV. Rheological studies of polymer degradation*. In *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 11, 8, (1973); S. 2031–2043.
- [LP00] Lacrampe, M. F.; Pabiot, J., *Defects in Surface Appearance of Injection Molded Thermoplastic Parts—A Review of Some Problems in Surface Gloss Distribution*. In *Journal of Injection Molding Technology*, December 2000. Vol. 4, No. 4, (2000); S. 167–176.
- [LR+01] Luyé, J.-F.; Régnier, G.; Le Bot, P.; Delaunay, D.; Fulchiron, R., *PVT measurement methodology for semicrystalline polymers to simulate injection-molding process*. In *Journal of Applied Polymer Science*. Volume 79, Issue 2, (2001); S. 302–311.
- [Ma08] Maikisch, M., *Wissen wie's läuft. Viskositätsmessung im Spritzgießen*. Priamus. In *Plastverarbeiter*. 10/2008 Sonderdruck, (2008).
- [Ma85] Matzke, A., *Prozeßrechnereinsatz beim Spritzgießen: ein Beitr. zur Erhöhung der Flexibilität in der Fertigung*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, (1985).
- [MC+12] Mulyana, R.; Cabrera, E.; Castro, J. M.; Lee, L. J.; Min, Y., *Injection Molding of Water Containing Thermoplastic Polyolefin*. In *International Polymer Processing The Journal of the Polymer Processing Society*, XXVII. 01, (2012); S. 9–17.
- [ME01] Meckbach, S.; Ehrenstein, G. W., *Erweitertes Optimierungsverfahren für den Spritzgießprozeß*. In *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. Volume 81, Issue Supplement S3, (2001).
- [MEG13] Markus Schmied; Erich Hochreiter; Georg Steinbichler, *Gesteuerter Schließvorgang, höchste Gewichtskonstanz*. In *Kunststoffe*, 08, (2013); S. 70–73.
- [MG+13] Macher, J.; Gruber, D. P.; Berger, G.; Friesenbichler, W., *Application of deflectometry for surface inspection of high-glossy injection-molded facing parts*. The proceedings of the austrian - slovenian polymer meeting (ASPM), Bled, Slovenia, (2013).
- [MG05] Michaeli, W.; Gruber, J.-M., *Prozessführung beim Spritzgießen - direkte Regelung des Werkzeuginnendrucks steigert die Reproduzierbarkeit*. In *Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology*, (2005); S. 1–12.
- [MGW12] Mielicki, C.; Gronhoff, B.; Wortberg, J., *Time and temperature dependent rheological model for PA12*. Polymer Processing Society Annual Meeting (PPS), Pattaya, Thailand, (2012).
- [MGW13] Mielicki, C.; Gronhoff, B.; Wortberg, J., *Rheological changes of PA12 under oscillatory shear*. Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting (PPS 29), Polymer Processing Society (PPS), Nuremberg, Germany, (2013).

- [MH+11a] Michaeli, W.; Hopmann, C.; Brinkmann, M.; Neuß, A.; Pütz, M., *Benchmarking the Technological Competence of Small and Medium-Sized Injection Molding Companies*. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Boston, Massachusetts (USA), (2011a).
- [MH+11b] Menges, G.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.; Schmachtenberg, E., *Werkstoffkunde Kunststoffe*. Carl Hanser Verlag, München, (2011b).
- [MHG04] Michaeli, W.; Hopmann, C.; Gruber, J.-M., *Prozessregelung beim Spritzgießen*. In *Kunststoffe*. 01, (2004); S. 20–24.
- [MHR11] Michaeli, W.; Hopmann, C.; Reißmann, A., *A self-optimising injection moulding process extendable by an incremental cooling system*. SPE European Technical Conference (Eurotec), Barcelona, (2011).
- [Mi06] Michaeli, W., *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Carl Hanser Verlag, München u.a, (2006).
- [Mi14] Mielicki, C., *Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Lasersintern von Polyamid 12*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2014).
- [MK05] Meyer, T.; Keurentjes, J., *Handbook of Polymer Reaction Engineering*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany, (2005).
- [MK96] Malkin, A. Y.; Kuličichin, S. G., *Rheokinetics; Rheological transformations in synthesis and reactions of oligomers and polymers*. Hüthig & Wepf, Zug [u.a.], (1996).
- [ML07] Mollenhauer, J.-P.; Lunau, S., *Design for Six Sigma+Lean Toolset*. Innovationen erfolgreich realisieren. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, (2007).
- [MM08] Michaeli, W.; Mäsing, R., *Vergleich des Betriebsverhaltens elektrohydraulischer und elektrisch-mechanischer Antriebssysteme für Spritzgießmaschinen*. 24. ikv Kolloquium, Aachen, (2008).
- [MM09] Moser, S.; Madl, D., *Effektives Einfahren eines Spritzgießprozesses*. In *Kunststoffe*. 08, (2009); S. 36–40.
- [Mo99] Monsheimer, S., *Werkstoffdaten für die FEM-Berechnung*. In *Kunststoffe*. 12, (1999); S. 79–82.
- [MSL08] Michaeli, W.; Schreiber, A.; Lettowsky, C., *Optimierung der Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen durch Online-Regelung auf Basis von Prozessgrößen*. In *Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology*. 4, (2008); S. 1–17.
- [Mu00] Mustafa, M. A.-H., *Modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung beim Kunststoffspritzgießen*. Shaker, Aachen, (2000).
- [Mu14] Mustafa, M. A.-H., *Ganzheitliche Ansätze zur Produktion qualitativ hochwertiger Oberflächen für Automobilinnenräume*. Spritzgießen und Veredeln, Duisburg, (2014).
- [MW+12] Mielicki, C.; Wegner, A.; Gronhoff, B.; Wortberg, J.; Witt, G., *Prediction of PA12 melt viscosity in Laser Sintering*. In *RTEjournal*. 09/2012, (2012).
- [Ne13] Neubig, N., *Werkstück und Maschine im ständigen Austausch*. In *Kunststoffe*. 06, (2013); S. 18–20.
- [Ng05] Nguyen, T. Q., *Polymer Degradation and Stabilization*. In *Handbook of Polymer Reaction and Engineering*, (2005); S. 757–831.
- [OH06] Osswald, T. A.; Hernández-Ortiz, J. P., *Polymer processing. Modeling and simulation*. Hanser Verlag, München, (2006).
- [OTG08] Osswald, T. A.; Turng, L.-S.; Gramann, P. J., *Injection molding handbook*. Carl Hanser Publishers; Hanser Gardner Publications, Munich, Cincinnati, (2008).



- [PB+13] Pacher, G.; Berger, G.; Gruber, D. P.; Friesenbichler, W., *Influence of process settings in the topography of sink marks*. Advances in Plastics Technology (APT), Sosnowiec, Poland, (2013).
- [PDE00] Pongratz, S.; Duriau-Montagne, F.; Ehrenstein, G. W., *Einfluss der Verarbeitung auf den Abbau von PA und PP*. In Kunststoffe. 09, (2000); S. 52–55.
- [PGL83] Pahl, M. H.; Gleißle, W.; Linnemann, D., *Praktische Rheologie der Kunststoffschmelzen und Lösungen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, (1983).
- [PGL91] Pahl, M. H.; Gleißle, W.; Laun, H.-M., *Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere*. VDI-Verlag, Düsseldorf, (op. 1991).
- [PGS12] Pillwein, G.; Giessauf, J.; Steinbichler, G., *Einfaches Umschalten auf konstante Qualität*. In Kunststoffe. 09, (2012); S. 31–35.
- [Pi12] *Patentschrift AT 511 391 A1 2012-11-15*. (15.11.2012), Pillwein, G.; ENGEL AUSTRIA GMBH, *Verfahren zur Quantifizierung von Prozessschwankungen bei einem Einspritzvorgang einer Spritzgießmaschine*.
- [PJ11] Pönisch, N.; Jüttner, G., *Prozessnahe Charakterisierung rheologisch kritischer Spritzgieß-Formmassen*. Technomer 2011, TU Chemnitz, Chemnitz, (2011).
- [Po00] Pongratz, S., *Alterung von Kunststoffen während der Verarbeitung und im Gebrauch*. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, (2000).
- [Pr13] Pressemitteilung Weber GmbH, *Kostensenkendes Familienwerkzeug; Galvanisiertes Sichtbauteil als Herausforderung*. In Kunststoffe. 06, (2013); S. 11.
- [Ra08] Rauwendaal, C., *SPC; Statistical process control in injection molding and extrusion*. Carl Hanser Publishers; Hanser Gardner Publications, Munich, Cincinnati, (2008).
- [Ra13] Raschke, F., *Prozessregelung mit iQ*. KuZ - Der gläserne Spritzgießprozess, Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH, Leipzig, (2013).
- [Re01] Reifenschneider, L. G., *Reliability of Mold Filling Simulation for Part Design*. In Journal of Injection Molding Technology, Vol. 5 March. No. 1, (2001); S. 38–48.
- [RF07] Ramm, A.; Fritz, H.-G., *Reaktive Kunststoffaufbereitungs- und Formgebungsprozesse mittels verbessertem Spritzgießcompounder (IMC)*. BMBF Abschlussbericht, Universität Stuttgart, Stuttgart, (2007).
- [Rö79] Rörick, W., *Zur Praxis der Prozeßregelung im Thermoplast-Spritzgußbetrieb*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, (1979).
- [Ro93] Rodgers, P. A., *Pressure–volume–temperature relationships for polymeric liquids: A review of equations of state and their characteristic parameters for 56 polymers*. In Journal of Applied Polymer Science, 48. 6, (1993); S. 1061–1080.
- [RO98] Rao, N. S.; O'Brien, K. T., *Design data for plastics engineers*. Hanser [u.a.], Munich [u.a.], (1998).
- [ROE11] Rudolph, N. M.; Osswald, T. A.; Ehrenstein, G. W., *Influence of Pressure on Volume, Temperature and Crystallization of Thermoplastics during Polymer Processing*. In International Polymer Processing The Journal of the Polymer Processing Society, XXVI. 03, (2011); S. 239–248.
- [SA06] Spurk, J. H.; Aksel, N., *Strömungslehre*. Springer, Berlin, Heidelberg [u.a.], (2006).
- [SB08] Steinko, W.; Bader, C., *Optimierung von Spritzgiessprozessen*. Carl Hanser Verlag, München, (2008).

- [Sc09] Schiffers, R., *Verbesserung der Prozessfähigkeit beim Spritzgießen durch Nutzung von Prozessdaten und eine neuartige Schneckenhubführung*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, (2009).
- [Sc11] Schreiber, A., *Regelung des Spritzgießprozesses auf Basis von Prozessgrößen und im Werkzeug ermittelter Materialdaten*. Mainz, Aachen, (2011).
- [Sc14] Schiffers, R., *Robuste Spritzgießprozesse mit adaptiver Prozessführung als Basis für eine effiziente Produktion hochwertiger Formteile*. Spritzgießen und Veredeln, Duisburg, (2014).
- [Sc86] Schmidt, T. W., *Zur Abschätzung der Schwindung*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, (1986).
- [Sc95] Scott, G., *Initiation processes in polymer degradation*. In *Polymer Degradation and Stability*, 48. 3, (1995); S. 315–324.
- [Se11] Seidel, A., *Properties and behavior of polymers*. Wiley, Hoboken, (2011).
- [SH+91] Smud, S. M.; Harper, D. O.; Deshpande, P. B.; Leffew, K. W., *Advanced process control for injection molding*. In *Polymer Engineering and Science*, 31. 15, (1991); S. 1081–1085.
- [SH12] Schnabel, A.; Hissmann, O., *Gelebte Qualität*. In *Kunststoffe international*. 04/2012, (2012); S. 69–73.
- [Si09] Sigloch, H., *Technische Fluidmechanik*. Springer, Berlin, Heidelberg, (2009).
- [SK04] Stitz, S.; Keller, W., *Spritzgießtechnik. Verarbeitung - Maschine - Peripherie*. Carl Hanser Verlag, München [u.a.], (2004).
- [SN04] Schmidberger, E.; Neher, J., *Machbar: fehlerfreie Produktion, Mit neuronalen Netzen zyklische Produktionsprozesse regeln*. In *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, 49, (2004); S. 67–68.
- [SN05] Schmidberger, E.; Neher, J., *Neuronal- Qualitätsbasierte Prozessüberwachung und -Regelung Nepres*. In *X-Press*. 3, (2005); S. 16–17.
- [St13] Stock, S., *Ein Gramm Kunststoff für ein Dutzend Versprechen*. In *Kunststoffe*. 07, (2013); S. 22–33.
- [St73] Stitz, S., *Analyse der Formteilkonstruktion beim Spritzgießen von Plastomeren als Grundlage für die Prozeßsteuerung*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, (1973).
- [SvH10] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T., *Statistische Versuchsplanung*. Design of Experiments (DoE). Springer, Heidelberg [u.a.], (2010).
- [SYS12] Sang-Won Woo; Yeong-Eun Yoo; Sun Kyoung Kim, *Injection molding without the drying*. In *Society of Plastics Engineers (SPE) Plastics Research Online*, (2012).
- [Ta01] Tabatabai, S. S., *Entwicklung und Analyse von Strategien zur prozeßzeitkonformen Qualitätssicherung beim Thermoplast-Spritzgießen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, (2001).
- [Th02] Tham Nguyen-Chung, *Strömungsanalyse der Bindahtformation beim Spritzgießen von thermoplastischen Kunststoffen*. Dissertation, TU Chemnitz, Chemnitz, (2002).
- [Th12] Thomas Brettnich, Simon Geltinger, *Präzision auf die Spitze getrieben*. In *Kunststoffe*. 03, (2012); S. 33–36.
- [TK09] Tutar, M.; Karakus, A., *3-D Computational Modelling of Process Condition Effects on Polymer Injection Molding*. In *International Polymer Processing The Journal of the Polymer Processing Society*, 24. 5, (2009); S. 384–398.

- [TS+10] Tobias Radermacher; Siegfried Helduser; Roland Mäsing; Michaeli, W., *Leistungsfähigkeit von Spritzgießmaschinen- Antrieben – ein Vergleich, Eine Untersuchung hinsichtlich Dynamik, Präzision, Energiebedarf und Produktqualität. In O+P Ölhydraulik und Pneumatik. 1-2/2010, (2010); S. 25–31.*
- [Uj99] Ujma, A., *Auswirkungen von Rohstoffchargenschwankungen auf den Spritzgießprozess und regelungstechnische Kompensationsstrategien.* Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, (1999).
- [Va96] Vaculik, R., *Regelung der Formteilqualität beim Spritzgießen auf der Basis statistischer Prozessmodelle.* Dissertation. Verl. der Augustinus-Buchh., RWTH Aachen, Aachen, (1996).
- [Vl12] Vlachopoulos, J., *Polymer Rheology and Extrusion,* McMaster University, Hamilton, Ontario (Canada), (2012).
- [VPM05] Van der Beek, M. H. E.; Peters, G. W. M.; Meijer, H. E. H., *The Influence of Cooling Rate on the Specific Volume of Isotactic Poly(propylene) at Elevated Pressures. In Macromolecular Materials and Engineering, 290. 5, (2005); S. 443–455.*
- [Wa00] Walter, A., *Methoden des prozeßnahen Qualitätsmanagements in der Kunststoffverarbeitung.* Shaker, Aachen, (2000).
- [Wa88] Wadiak, D., *The modelling of aging processes in aerospace materials. In Mathematical and Computer Modelling, 11, (1988); S. 709–712.*
- [Wh06] White, J. R., *Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect. In Comptes Rendus Chimie, 9. 11-12, (2006); S. 1396–1408.*
- [Wi03] Wimmer, G., *Unterstützung für die Bauteilentwicklung. In Kunststoffe. 11, (2003); S. 74–77.*
- [Wi09] Winter, H. H., *Three views of viscoelasticity for Cox–Merz materials. In Rheol. Acta (Rheologica Acta), 48. 3, (2009); S. 241–243.*
- [WJK04] Wortberg, J.; Jarosch, P.; Kamps, T., *Comparison of drive concepts on injection moulding machines under production conditions. SPE Annual Technical Conference (ANTEC), Society of Plastics Engineers (SPE), Chicago (IL), USA, (2004).*
- [WLF55] Williams, M. L.; Landel, R. F.; Ferry, J. D., *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. In Journal of the American Chemical Society, (1955); S. 3701–3707.*
- [Wo86] *Patentschrift DE3524310 C1. (19.06.1986), Woebcken, W., Verfahren und Vorrichtungen zum geregelten Spritzgießen auf verschiedenen Kunststoff-Spritzgießmaschinen mit stets gleichen Formteileigenschaften und gleichen Massen. Pr.: 11.04.1985.*
- [Wo96] Wortberg, J., *Qualitätssicherung in der Kunststoffverarbeitung. Rohstoff-, Prozeß- und Produktqualität Tabellen.* Carl Hanser Verlag, München [u.a.], (1996).
- [WS03] Wortberg, J.; Schroer, T., *Mehr Effizienz beim Trocknen. In Kunststoffe. 10, (2003); S. 149–154.*
- [WS07] Wortberg, J.; Schiffers, R., *The use of inherent process data of modern injection molding machines in reference to the produced quality. Polymer Processing Society Annual Meeting (PPS), Salvador, Brasilien, (2007).*
- [WSF08] Wortberg, J.; Schiffers, R.; Ferrière, C., *Identification of raw material condition by process monitoring and derived control strategies in injection moulding. Polymer Processing Society Annual Meeting (PPS), Salerno, Italien, (2008).*
- [Wu05] Wunderlich, B., *Thermal analysis of polymeric materials. With 974 figures.* Springer Heidelberg, New York, (op. 2005).

- [Wü07] Wünsch, G., *Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme*. Dissertation, Technische Universität München, München, (2007).
- [ZGB97] Zhang, T.; Gawne, D.; Bao, Y., *The influence of process parameters on the degradation of thermally sprayed polymer coatings*. In *Surface and Coatings Technology*, 96. 2-3, (1997); S. 337–344.
- [ZPM01] Zuidema, H.; Peters, G. W. M.; Meijer, H. E. H., *Influence of cooling rate on pVT-data of semi-crystalline polymers*. In *Journal of Applied Polymer Science*, 82. 5, (2001); S. 1170–1186.

## Unveröffentlichte, durch den Autor betreute, studentische Arbeiten

- [a1] Weiß, P., *Erfassung des aktuellen Standes im rationellen Umgang mit Prozessenergie in der kunststoffverarbeitenden Industrie durch eine Branchenanalyse*. Masterarbeit, (2011).
- [a2] Amelung, S., *Entwicklung eines Prototypensystems zur Messung der lokalen Bahnspannung an Folienblasanlagen*. Masterarbeit, (2011).
- [a3] Paradowski, M., *Energetische Abbildung der Prozessbedingungen einer Prototypenanlage für alternative Plastifizierung durch Erdgasenergie*. Bachelorarbeit, (2012).
- [a4] Kolberg, J., *Konzeptionierung eines Systems zur effizienten Nutzung der Abgasenergie von erdgasbetriebenen Zylindertemperierungen*. Bachelorarbeit, (2012).
- [a5] Backsmann, A., *Abbildung der energetischen Prozessbedingungen im Spritzgießen in einem Berechnungsmodell zur Validierung von Optimierungspotentialen*. Masterarbeit, (2012).
- [a6] Siepmann, J., *Analyse von Restfeuchteschwankungen bei technischen Kunststoffen für den Kunststoffspritzgießprozess*. Bachelorarbeit, (2012).
- [a7] Bach, T., *Modellbasierte Charakterisierung von Fließeigenschaften technischer Kunststoffe unter Zeit-, Temperatur- und Restfeuchteinfluss*, Bachelorarbeit, (2013).
- [a8] Leopold, F., *Konzeptionierung und Auslegung eines Spritzgießwerkzeuges für ein Gaspedal für einen Kleinserienrennwagen*. Bachelorarbeit, (2013).
- [a9] Stevens, S., *Online Qualitätsprognose von materialinduzierten Prozessstörungen im Spritzgießen anhand von prozessnahen hochauflösenden Kennzahlen*. Bachelorarbeit, (2013).
- [a10] Langehegermann, J., *Identifizierung von Potentialen zur Qualitätssteigerung in der Produktion von galvanisierten Kunststoffspritzgießbauteilen durch eine gezielte Prozessanalyse*. Projektarbeit, (2013).
- [a11] Mistler, M., *Integration einer autonomen, druckadaptiven Regelung zur Kompensation von Störungen im Spritzgießen*. Masterarbeit, (2013).
- [a12] Siepmann, J., *Simulation von materialinduzierten Prozessschwankungen beim Spritzgießen zur Ableitung von Kompensationsstrategien*. Masterarbeit, (2013).
- [a13] Rosenfeld, R., *Rheologische und thermodynamische Charakterisierung technischer Kunststoffe unter Restfeuchte- und Chargeneinflüssen*. Bachelorarbeit, (2014).
- [a14] Rybakov, I., *Integrative Auswertung von Prozess- und Materialeinflüssen auf die Oberflächenqualität von Spritzgießbauteilen*. Masterarbeit, (2014).
- [a15] Langehegermann, J., *Qualitätssteigerung in der Produktion von galvanisierten Kunststoffspritzgießbauteilen durch eine gezielte Prozessführung und Qualitätskontrolle*. Diplomarbeit, (2014).

- [a16] Stanko, M., *Validierung von Kompensationsstrategien von Qualitätsstörungen im Spritzgießen durch eine modellgestützte Prozesssimulation*, Masterarbeit, (2014).
- [a17] Bach, T., *Entwicklung eines Verfahrens zu inline Kopplung des Extrusions- und Spritzgießprozesses zur Steigerung der Prozessqualität und Energieeffizienz bei der Compoundverarbeitung*. Masterarbeit, (2014).

## Eigene Veröffentlichungen des Autors

- [b1] Dörner, J.; Heinzler, F. A.; Lenzen, M.; Wortberg, J., *Kennzahlen zum objektiven Energievergleich*. In *Kunststoffe*. 7, Carl Hanser Verlag, München, (2011), S. 31-34.
- [b2] Dörner, J.; Heinzler, F. A.; Lenzen, M.; Wortberg, J., *Indices for an Objective Efficiency Comparison*. In *Kunststoffe international*. 07, Carl Hanser Verlag, Munich, (2011), S. 22-25.
- [b3] Heinzler, F. A.; Wortberg, J., *Natural gas as main energy source for polymer plasticizing with a special designed heat exchanger*. 1th European Meeting Society of Plastics Engineering (SPE Eurotec), Barcelona, Spain, (2011).
- [b4] Wortberg, J.; Heinzler, F. A., *Sustainable developments in polymer technology*. Congress Polymer Technology, Zwolle, Netherlands, (2012).
- [b5] Heinzler, F. A.; Weiß, P.; Wortberg, J., *Politik gibt die Regeln vor*. In *Kunststoffe*. 3, Carl Hanser Verlag, München, (2012), S. 24-28.
- [b6] Heinzler, F. A.; Wortberg, J., *Thickness profile effects on the build-up process of film rolls*. Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference (SPE Antec), Orlando, USA, (2012).
- [b8] Heinzler, F. A.; Weiß, P.; Wortberg, J., *Wenn Effizienzpotenziale aus Unwissenheit liegen bleiben*. In *Kunststoffe*. 6, Carl Hanser Verlag, München, (2012), S. 74 – 78.
- [b9] Heinzler, F. A.; Weiß, P.; Wortberg, J., *When Efficiency Potentials Remain Unused Due to Uncertainty*. In *Kunststoffe international*. 06, Carl Hanser Verlag, Munich, (2012), S. 50-54.
- [b10] Schiffers, R.; Heinzler, F. A., Patent/Applikation DE102012104493A1: *Verfahren zum Betrieb von Produktionsmaschinen/Kunststoff verarbeitenden Maschinen*.
- [b11] Heinzler, F. A., Wortberg, J., *Winding defects referred to surface modification of blown films by corona treatment*. Proceedings of Polymer Processing Society 28th (PPS), Pattaya, Thailand, (2012).
- [b12] Lenzen, M.; Heinzler, F. A.; Heumann, T.; Backsmann, A.; Wortberg, J., *Potential for efficiency improvements at different injection molding machines*. Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference (SPE Antec), Cincinnati Ohio, USA, (2013).
- [b13] Hrsg. Proff, H., *Herausforderungen für das Automotive Engineering & Management - Technische und betriebswirtschaftliche Ansätze*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 365801816X.
- [b14] te Heesen, O.; Heinzler, F. A., *Technische Produkte und nachhaltige Produktion*. In *Kunststoffe*. 06, Carl Hanser Verlag, München, (2013), S. 74-76.
- [b15] te Heesen, O.; Heinzler, F. A., *Technical Products and Sustainable Production*. In *Kunststoffe international*. 06, Carl Hanser Verlag, Munich, (2013), S. 41 – 43.
- [b16] Wortberg, J.; Heinzler, F. A., *Optimized build-up process of film rolls by enhanced reversion control*. In *Journal of Plastics Technology*. 04/2013, Carl Hanser Verlag, Munich, (2013), S. 160-177.
- [b17] Heinzler, F. A.; Wortberg, J., *Inline quality prognosis of material induces process disturbances*. Proceedings of Polymer Processing Society 29th, PPS, Nuremberg, Germany, (2013).
- [b18] Heinzler, F. A.; Wortberg, J., *Process and Quality control in injection molding with focus on surface properties*. Advances in plastics technology, APT '13, Sosnowiec, Poland, (2013).

- [b19] Heinzler, F. A.; Bach, T.; Wortberg, J., *The rheological behavior of technical polymers with process adapted influences of charges, time, temperature and residual humidity*. Advances in plastics technology, APT '13, Sosnowiec, Poland, (2013).
- [b20] Heinzler, F. A.; Kruppa, S.; Schiffers, R.; Wortberg, J., *Materialcharakterisierung mit Prozessdaten aus der Spritzgießmaschine*. In *Kunststoffe*. 02, Carl Hanser Verlag, München, (2014), S. 52-56.
- [b21] Heinzler, F. A.; Kruppa, S.; Schiffers, R.; Wortberg, J., *Useful Process Data from the Injection Molding Machine*. In *Kunststoffe international*. 02, Carl Hanser Verlag, München, (2014), S. 42-46.
- [b22] Heinzler, F. A.; Wortberg, J. *Inline quality prognosis of material condition induced process variations*. In AIP Conference Proceedings 1593, 163 (2014), proceedings of PPS-29: The 29th International Conference of the Polymer Processing Society, Nuremberg, (2014), ISBN: 978-0-7354-1227-9.
- [b23] Heinzler, F. A.; Mistler, M.; Wortberg, J., *Quality improvement by enhanced pressure controlled injection molding*. Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference (SPE Antec), Las Vegas (Nevada), USA, (2014).
- [b24] Heinzler, F. A.; Siepmann, J.; Wortberg, J., *Modelling of moisture effects on the rheological behavior of polymers and influences on the injection molding process*. Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference (SPE Antec), Las Vegas (Nevada), USA, (2014).
- [b25] Heinzler, F. A.; Weiß, P., *Das Spritzgießen mit seinen Ansatzpunkten zu energieeffizienten Lösungen – ein Überblick*. Prozesstechnik-Forum Energieeffizientes Spritzgießen, Frankfurt, (2014).
- [b26] Heinzler, F. A.; Weiß, P., *Produktion hochwertiger, funktioneller Oberflächen*. In *Kunststoffe*. 08, Carl Hanser Verlag, München, (2014), S. 20-30.
- [b27] Heinzler, F. A.; Wortberg, J., *Adaptive process control in injection molding*. 58<sup>th</sup> Ilmenau Scientific Colloquium (IWK), Ilmenau (Germany), (2014), URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk:3.

### Eingereichte Veröffentlichungen

- [b28] Heinzler, F. A.; Mielicki, C.; Wortberg, J., *A viscosity model for technical polymers describing chemical and physical aging*. In *Polymer Engineering and Science*. (2015), (angenommen).
- [b29] Heinzler, F. A.; Wortberg, J., *Qualitätsregelung beim Spritzgießen (Teil 1): Rheologische Untersuchung prozessrelevanter Alterungseinflüsse*. In *Zeitschrift Kunststofftechnik - Journal of Plastics Technology*. Carl Hanser Verlag, München, (2014).
- [b30] Heinzler, F. A.; Wortberg, J., *Qualitätsregelung beim Spritzgießen Teil 2: Adaptive, druckgeregelte Prozessführung*. In *Zeitschrift Kunststofftechnik - Journal of Plastics Technology*. Carl Hanser Verlag, München, (2014).

## 10 Anhang

### 10.1 Materialien

- PA 6: Lanxess Deutschland GmbH - Durethan B 30 S
- PBT: Lanxess Deutschland GmbH - Pocan B1305
- PC: Bayer MaterialScience AG - Makrolon LED 2245, 2808
- ABS: Styrolution Group GmbH - Novudur P2MC

### 10.2 Verwendete Messmittel

- Rotationsrheometer: Malvern Instruments - Bohlin Gemini II
- Hochdruckkapillarviskosimeter: GÖTTFERT Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH - Göttfert Rheograph 25
- Restfeuchtemessgerät: Brabender Messtechnik GmbH & Co. KG - Brabender Aquatrac
- DSC: Mettler-Toledo GmbH - DSC1
- Digitale Spiegelreflexkamera: Canon GmbH - EOS 600D
- Kofokalmikroskop: NanoFocus AG -  $\mu$ surf custom
- Optisches Profilometer / Weißlicht Interferometrie: nanoAnalytics GmbH
- Rasterelektronenmikroskop: Carl Zeiss Microscopy GmbH - EVO MA 10

### 10.3 Modellparameter Rheologie

Tabelle 10-1 Modellparameter PBT

A [Pas]	B [s]	C [-]	$E_0$ [kJ/mol]	$a_{SC,UL}$ [-]	$a_{PC,IS}$ [-]	$E_{0,SC}$ [kJ/mol]	$k_o$ [1/s]	$T_o$ [K]
158,00	$3,80 \cdot 10^{-4}$	0,80	44,29	$-5,97 \cdot 10^{10}$	-0,80	314,98	$1,20 \cdot 10^1$ <sub>6</sub>	533,15

Tabelle 10-2 Modellparameter PA 6

A [Pas]	B [s]	C [-]	$E_0$ [kJ/mol]	$a_{SC,UL}$ [-]	$a_{PC,IS}$ [-]	$E_{0,SC}$ [kJ/mol]	$k_o$ [1/s]	$T_o$ [K]
210,65	$7,60 \cdot 10^{-4}$	0,76	57,11	$3,10 \cdot 10^{10}$	-1,12	76,39	$1,63 \cdot 10^{-7}$	533,15

Tabelle 10-3 Modellparameter PC

A [Pas]	B [s]	C [-]	$E_0$ [kJ/mol]	$a_{PC,IS}$ [-]	$T_o$ [K]
501,73	$6,63 \cdot 10^{-4}$	0,89	106,29	-2,07	573,15

### 10.4 Spritzgießmaschine, Sensorik und Beistellaggregate

- Spritzgießmaschine: KraussMaffei Technologies GmbH – KM 180-750 AX
- Trockenlufttrockner: digicolor Gesellschaft für Kunststoffmaschinen-technik mbH - D210NT-S
- Werkzeuginnendrucksensor: Kistler Instrumente AG - 6152A
- Werkzeugtemperierung: aic-regloplas GmbH - P160M

## 10.5 Maschineneinstellungen

Tabelle 10-4 Maschineneinstellungen PBT

Plastifizierdrehzahl	Schneckenhub	Umschalt- punkt	Nach- druckzeit	Nachdruck- höhe	Stau- druck	Temperatur- profil
150 1/min	28 mm	5,8mm	13s	350bar	50bar	Flansch: 40°C, Z1: 240°C Z2: 260°C Z3 260°C Z4 260°C Z11: 260°C

Tabelle 10-5 Maschineneinstellungen PA 6

Plastifizierdrehzahl	Schneckenhub	Umschalt- punkt	Nach- druckzeit	Nachdruck- höhe	Stau- druck	Temperatur- profil
150 1/min	28 mm	6,1mm	12s	355bar	50bar	Flansch: 40°C Z1: 240°C Z2: 260°C Z3 260°C Z4 260°C Z11: 260°C

Tabelle 10-6 Parametrierung PID-Regler

Parameter	
$K_p$	0,19
$K_i$	1,1
$K_d$	0,01



## Curriculum Vitae

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.